

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique  
Laboratoire de Génie Electrique de Guelma - LGEG

**THÈSE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**DOCTORAT EN 3<sup>ème</sup> CYCLE**

Domaine : Génie électrique                      Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Réseaux électriques

Présentée par

**MOUHOUB Sarra**

*Intitulée*

**Etude expérimentale de la dynamique de triboélectrification  
des particules isolantes dans un canal métallique**

Soutenue le : 22/04/2026

Devant le Jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>		
<b>Mr. Moussaoui Abdelkrim</b>	Professeur	Univ. de Guelma	Président
<b>Mr. Kachi Miloud</b>	Professeur	Univ. de Guelma	Encadreur
<b>Mr. Zouzou Noureddine</b>	Professeur	Univ. de Poitiers	Co-encadreur
<b>Mr. Nouri Hamou</b>	Professeur	Univ. de Sétif 1	Examinateur
<b>Mr. Remadnia Mokdad</b>	MCA	Univ. de Guelma	Examinateur

**Année Universitaire : 2025/2026**

# **Dédicaces**

*À ma chère mère...*

*À mon cher père...*

*À mes chers enfants...*

*À mon cher mari...*

# Remerciements

Tout d'abord, un grand merci et louanges à **Dieu** qui m'a toujours donné la volonté et la patience pour arriver à ce résultat et terminer ce travail.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, le **Pr. KACHI Miloud**. Merci pour tout le soutien et les conseils que vous m'avez apportés durant votre encadrement. Je vous remercie également pour votre patience et votre compréhension. Merci pour tout ce que j'ai appris de vous et pour avoir bénéficié de votre expertise.

Je tiens également à remercier mon co-directeur de thèse, **Pr. ZOZOU Noureddine**, de *l'institut Pprime de l'université de Poitiers*, pour son suivi de mes travaux et ses précieux commentaires et conseils. Ce fut un plaisir de travailler sous sa direction.

Je remercie sincèrement **Pr. MOUSSAOUI Abdelkrim**, pour accepter de présider le jury de soutenance. Je tiens également à remercier les membres du jury **M. REMADNIA Mokdad** et **M. HAMOU Nouri** pour leur présence et leur jugement de ma soutenance.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les membres de laboratoire de Génie Electrique de l'université de Guelma (**LGEG**).

Mes sincères remerciements également à tous les enseignants du département de Génie Electrique de l'université de Guelma, je cite en particulier **BABOURI Abdesselam**, **GOUAIDIA Said**, **BOUNAYA Kamel**, **MENDACI Sofiane**, **LEMZADMI Ahcene**, **BELOUCIF Faissel**, **BOULOUH Messaoud**, **LADJIMI Abdelaziz** et **FERAGA Chamseddine**.

Je tiens à remercier personnellement et tout particulièrement **Mme. FETISSI Selwa**, **M. DAFRI Mourad** et **Mme. ADJISSI Nabila**. Mes remerciements également à tous *mes collègues*, et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

## ملخص

الكهرباء الساكنة، الناتجة عن الشحن الكهربائي الاحتكاكي بين مادتين عازلتين أو بين مادة عازلة وأخرى موصلة، ظاهرة شائعة تحدث يوميًا تقريبًا في حياتنا. ورغم اعتبارها غير مرغوب فيها، فقد استُغلت في العديد من التطبيقات المفيدة، بما في ذلك الفصل الكهروستاتيكي لمخاليط الجسيمات ومولدات النانو الكهربائية الاحتكاكية. ورغم الدراسات والأبحاث العديدة التي أجراها العديد من الباحثين والنتائج المتنوعة التي تم التوصل إليها حول الشحن الكهربائي الاحتكاكي، لا تزال هذه الظاهرة غير مفهومة جيدًا وتثير العديد من التساؤلات. تهدف هذه الأطروحة إلى تحليل السلوك الكهروستاتيكي لأسطح بوليمرية مختلفة، ودراسة تأثير العوامل الداخلية والخارجية المختلفة على الشحن الكهربائي الاحتكاكي. ولتحقيق هذا الهدف، تم إعداد نظام تجريبي لشحن الجسيمات كهربائيًا احتكاكيًا. خُصص جزء من هذا العمل لنمذجة الشحنة الكهربائية الاحتكاكية باستخدام طريقتين مختلفتين للتنبؤ: طريقة مونت كارلو وطريقة التعلم الآلي. أظهرت النتائج أن كلتا الطريقتين قادرتان على التنبؤ بالشحنة الكهربائية الاحتكاكية، وأن النتائج قريبة جدًا من النتائج التجريبية. قدمنا أيضًا دراسة تجريبية حول تأثير طول الأنبوب ودرجة حرارته على الشحنة الكهربائية الاحتكاكية للجسيمات، بالإضافة إلى تأثير الظروف المحيطة. أظهرت النتائج أن لهذه العوامل تأثيرًا واضحًا على شحنة الجسيمات. كما خصصنا جزءًا كبيرًا من هذه الرسالة لدراسة تأثير الشحنة الابتدائية، وكمية كتلة الجسيمات، وزاوية ميل الأنبوب، بالإضافة إلى نوع الجسيمات، على شحنة تشبع مجموعة من الجسيمات بحجم المليمتر. وقد حصلنا على نتائج مثيرة للاهتمام، لا سيما فيما يتعلق بتأثير الشحنة الابتدائية، حيث تؤثر قيمة الشحنة الابتدائية وقطبية شحنة الجسيمات على شحنة تشبع هذه الجسيمات.

**الكلمات المفتاحية:** الجسيمات، البوليمر، الكهرباء الساكنة، الأنبوب المائل، الشحن الكهربائي الاحتكاكي، الشحنة

الأولية، شحنة التشبع.

## Résumé

L'électricité statique, résultant du chargement triboélectrique entre deux matériaux isolants ou entre un matériau isolant et un matériau conducteur, est un phénomène bien connu qui se produit presque quotidiennement dans notre vie. Bien que considérée comme indésirable, l'électricité statique a été exploitée dans de nombreuses applications utiles, notamment la séparation électrostatique des mélanges de particules et les nanogénérateurs triboélectriques (TENG). Malgré les nombreuses études et recherches menées par de nombreux chercheurs et les divers résultats obtenus sur la tribocharge, ce phénomène reste encore mal compris et suscite de nombreuses questions. L'objectif de cette thèse est d'analyser le comportement électrostatique de diverses surfaces polymères et d'étudier l'influence de différents facteurs internes et externes sur la charge triboélectrique. Pour atteindre cet objectif, une installation expérimentale pour charger les particules par triboélectricité a été réalisée. Une partie de ce travail a été consacrée à la modélisation de la charge triboélectrique à l'aide de deux méthodes de prédiction différentes : la méthode de "Monte Carlo" et la méthode de "Machine Learning". Les résultats ont montré que les deux méthodes sont capables de prédire la charge triboélectrique, et les résultats sont très proches des résultats expérimentaux. Nous avons également présenté une étude expérimentale sur l'effet de la température et de la longueur du tube sur la charge triboélectrique des particules, et également l'effet des conditions ambiantes. Les résultats ont montré que ces facteurs ont un impact évident sur la charge des particules. Nous consacrons également une grande partie de cette thèse à l'étude de l'impact de la charge initiale, de la quantité massique des particules, de l'angle d'inclinaison du tube ainsi que du type de particules sur la charge de saturation d'un groupe de particules de taille millimétrique. Nous avons obtenu des résultats intéressants, notamment concernant l'influence de la charge initiale, où la valeur de la charge initiale et la polarité de la charge des particules ont un impact sur la charge de saturation de ces particules.

**Mots clés :** Particules, Polymère, Electricité statique, Tube incliné, Chargement triboélectrique, Charge initiale, Charge de saturation.

# Abstract

Static electricity, resulting from triboelectric charging between two insulating materials or between an insulator and a conductor, is a common phenomenon that occurs almost daily in our lives. Although considered undesirable, it has been exploited in many useful applications, including the electrostatic separation of particle mixtures and triboelectric nanogenerators (TENG). Despite numerous studies and research conducted by various researchers and the diverse findings on triboelectric charging, this phenomenon remains poorly understood and raises many questions. This thesis aims to analyze the electrostatic behavior of various polymer surfaces and to study the influence of various internal and external factors on triboelectric charging. To achieve this goal, an experimental system for triboelectric particle charging was developed. Part of this work was devoted to modeling the triboelectric charge using two different prediction methods : “Monte Carlo” and “Machine Learning”. The results showed that both methods were able to predict the triboelectric charge and that the results were very close to experimental results. We also presented an experimental study on the effect of tube length and temperature on the triboelectric charge of particles, in addition to the effect of ambient conditions. The results showed that these factors clearly influence the particles' charge. We also devoted a large portion of this thesis to investigating the effect of the initial charge, the mass quantity of particles, the tube inclination angle, and the particles type on the saturation charge of a set of millimeter-sized particles. We obtained interesting results, particularly regarding the effect of the initial charge, as the initial charge and the polarity of the particles' charge affect the saturation charge of these particles.

**Key words :** Particles, Polymer, Static electricity, Inclined tube, Triboelectric charge, Initial charge, Saturation charge.

# Liste des publications

---

## Articles parus dans des Revues Internationales

- [S. Mouhoub](#), M. Kachi, and N. Zouzou, “Influence of the initial charge on the triboelectrification of millimeter size set of particles in an inclined tube,” *Powder Technology*, vol. 428, p. 118862, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2023.118862.

## Communications Internationales

- [S. Mouhoub](#), M. Kachi, and N. Zouzou, “The impact of the initial charge on the triboelectric behavior of insulating particles crossing a metallic tube,” *12ème conférence de la Société Française d’Electrostatique, SFE’2023, Cherbourg en Cotentin, France*, 04-06 juillet, 2023, pp. 140–143. Available: <https://hal.science/hal-04494111>
- M. Kachi, H. Bechkoura, [S. Mouhoub](#), and A. Bouchelkha, “A Graphical Tool For The Tracking of A Single Particle In An Electric Field,” *2nd Electrical Engineering International Conference (EEIC’23), University of Bejaia, Algeria*, 05-06 December, 2023. Available: <https://eeic23.sciencesconf.org/>
- [S. Mouhoub](#), “Effect of tube inclination angle and particles type on saturation charge,” *14th International Conference on Mechanical Engineering (CME2024), École Militaire Polytechnique "Chahid Abderrahmane Taleb", Bordj El-Bahri, Algiers, Algeria*, 07-08 May, 2024. Available: <http://www.emp.mdn.dz/events/cme2024/index.html>

## Communications Nationales

- [S. Mouhoub](#) and M. Kachi, “Tribocharge of insulating particles in contact with metallic pipe : influence of the length and temperature,” *1th National Conference on Electrical Engineering and its Applications (NCEEA’01), University of Guelma, Algeria*, 15 November, 2022.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	18
<b>Chapitre I État de l'art de la Triboélectricité</b> .....	24
I.1 Chargement par effet triboélectrique.....	25
I.1.1 Mécanismes physiques.....	26
I.1.2 Série triboélectrique.....	30
I.1.3 Différentes applications du tribochargement électrostatique.....	33
I.2 Dispositifs de chargement triboélectrique.....	34
I.2.1 Dispositif de charge à cylindre rotatif.....	34
I.2.2 Dispositif de chargement par cyclone.....	35
I.2.3 Dispositif de chargement statique.....	36
I.2.4 Dispositif de charge à lit fluidisé.....	37
I.2.5 Dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique.....	40
I.2.6 Dispositif de chargement par vibrations.....	41
I.2.7 Dispositif de charge par ventilateur.....	43
I.3 Facteurs influençant le processus de chargement triboélectrique.....	44
I.3.1 Influence de la force de contact.....	45
I.3.2 Influence de la durée du contact.....	45
I.3.3 Influence de la taille des particules.....	45
I.3.4 Influence de la forme des particules.....	46
I.3.5 Influence de la rugosité de surface.....	46
I.3.6 Influence de la structure et la composition chimiques.....	47
I.3.7 Influence de l'humidité relative.....	47
I.4 Problématique du phénomène de chargement triboélectrique.....	48
<b>Conclusions</b> .....	49
<b>Chapitre II Installations et méthodes expérimentales</b> .....	51
II.1 Matériaux granulaires étudiés.....	52
II.2 Caractéristiques des matériaux étudiés.....	52
II.2.1 Polypropylène (PP) .....	53

II.2.1.1	Caractéristiques du polypropylène.....	53
II.2.1.2	Différentes utilisations du polypropylène.....	54
II.2.2	Polystyrène (PS).....	55
II.2.2.1	Caractéristiques du Polystyrène.....	56
II.2.2.2	Domaine d'application du polystyrène.....	57
II.2.3	Polyéthylène (PE).....	57
II.2.3.1	Caractéristiques du Polyéthylène.....	58
II.2.3.2	Domaines d'utilisation du polyéthylène.....	58
II.3	Installations et procédures expérimentales.....	59
II.3.1	Dispositif de charge par effet triboélectrique.....	59
II.3.1.1	Description du dispositif de chargement par effet triboélectrique.....	59
II.3.1.2	Étapes expérimentales du dispositif de charge par effet triboélectrique.....	60
II.3.2	Dispositif de charge par effet couronne.....	62
II.3.2.1	Description du dispositif de chargement par effet couronne.....	62
II.3.2.2	Étapes expérimentales du dispositif de charge par effet couronne.....	63
II.4	Méthodes de mesures.....	63
II.4.1	Mesure de la charge à l'aide d'une cage de Faraday.....	64
II.4.2	Mesure de la masse granulaire.....	66
II.4.3	Mesure de la température et de l'humidité relative (conditions atmosphériques).....	66
II.4.4	Mesure de la température de surface de l'installation.....	68
II.4.5	Mesure de potentiel de surface à l'aide d'un voltmètre électrostatique.....	68
II.5	Reproductibilité des mesures.....	70
	<b>Conclusions.....</b>	<b>70</b>
	<b>Chapitre III Impact de la longueur et de la température de tuyau galvanisé sur la tribocharge et prédiction de la charge triboélectrique des particules en mouvement à l'intérieur du tuyau galvanisé.....</b>	<b>73</b>
III.1	Temps et vitesse de passage des particules dans le tube galvanisé.....	74
III.2	Humidité et température à l'intérieur de tube galvanisé avant et après chauffage.....	74
III.3	Influence de la longueur du tube (Galvanisé/PVC) sur la tribocharge de particules (PE/PP) .....	76

III.3.1 Effet de la longueur du tube galvanisé sur la charge de granules de Polyéthylène.....	76
III.3.2 Effet de la longueur du tube PVC sur la charge de granules de Polypropylène ...	77
III.4 Influence de la longueur et de la température du tube métallique galvanisé sur la tribocharge des particules récupérées de Polypropylène (PP).....	78
III.4.1 Profil du potentiel de surface.....	80
III.4.1.1 Profil d'un échantillon de particules de polypropylène vierges (non chargées) .....	80
III.4.1.2 Profil de l'effet de la longueur et de la température du tuyau galvanisé sur la tribocharge des particules de Polypropylène.....	81
III.5 Charge de saturation.....	84
III.6 Prédiction de la tribocharge des polymères granulaires (PP) en mouvement dans un tube métallique galvanisé.....	85
III.6.1 Modèle d'estimation de "Monte Carlo".....	85
III.6.2 Modèle de prédiction par "Machine-learning" .....	87
III.7 Influence des conditions ambiantes sur la charge des particules.....	88
III.7.1 Tube galvanisé avec les particules de PP, PS, PE.....	88
III.7.2 Tube en PVC avec les particules de PP, PS, PE.....	90
<b>Conclusions</b> .....	91
<b>Chapitre IV Impact de la charge initiale, de la quantité massique, de l'angle d'inclinaison du tuyau et du type de particules sur la charge de saturation d'un groupe de particules millimétriques dans un tube incliné.....</b>	<b>94</b>
IV.1 Modèle d'ajustement.....	95
IV.2 Accumulation de charge triboélectrique.....	96
IV.3 Influence de la charge initiale sur la charge de saturation des particules (Tube de cuivre) .....	96
IV.3.1 Charge initiale obtenue par décharge corona.....	96
IV.3.1.1 Polarité identique entre la charge initiale et la charge de saturation.....	97
IV.3.1.2 Polarité opposée entre la charge initiale et la charge de saturation.....	99
IV.3.2 Charge initiale obtenue par triboélectrification.....	101
IV.4 Influence de la charge initiale sur la charge de saturation des granules (Tube galvanisé / Tube PVC) .....	102

IV.4.1 Charge initiale obtenue par décharge corona.....	102
IV.4.2 Charge initiale obtenue par triboélectrification.....	104
IV.5 Influence de la quantité massique sur la charge de saturation des particules de Polypropylène (PP).....	105
IV.5.1 Tube de cuivre.....	105
IV.5.2 Tube galvanisé.....	107
IV.5.3 Tube en Polychlorure de vinyle (PVC) .....	109
IV.6 Influence de l'angle d'inclinaison du tuyau sur la charge de saturation des particules de Polypropylène.....	110
IV.7 Influence du type de particules sur la charge de saturation des granules.....	112
IV.7.1 Tube galvanisé.....	112
IV.7.2 Tube en PVC.....	114
<b>Conclusions.....</b>	<b>115</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>118</b>
<b>Perspectives.....</b>	<b>121</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>123</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Représentation schématique du phénomène de l'électricité statique.....	19
<b>Figure 2.</b> Les trois phases de transport pneumatique.....	20
<b>Figure I.1 :</b> Le chargement par effet triboélectrique et le transfert de la charge électrique entre deux surfaces en contact : (a) :1. La surface A est neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A est en contact avec la particule B ; 3. Après la séparation, la surface A présente une tendance à se charger avec une polarité négative, tandis que la particule B acquiert une charge positive ; (b) :1. Deux particules neutres de taille identique sont en contact ; 2. Les grosses particules ont tendance à être chargées positivement, tandis que les particules de petite taille ont une charge négative.....	26
<b>Figure I.2 :</b> Les trois mécanismes possibles de transfert de charge entre deux matériaux en contact : a) Transfert d'électron ; b) Transfert d'ion ; c) : Transfert de matière.....	28
<b>Figure I.3 :</b> Série triboélectrique expérimentale pour divers matériaux plastiques employés dans l'industrialisation d'appareils informatiques et électriques.....	31
<b>Figure I.4 :</b> Conception schématique du séparateur triboélectrique.....	33
<b>Figure I.5 :</b> Modes opératoires des nano-générateurs triboélectriques : (a) Contact-séparation mode, (b) Sliding mode, (c) Single électrode mode et (d) Freestanding mode.....	34
<b>Figure I.6 :</b> Illustration schématique d'un dispositif de chargement triboélectrique utilisant un cylindre rotatif.....	35
<b>Figure I.7 :</b> Illustration schématique d'un dispositif de chargement triboélectrique par cyclone...36	
<b>Figure I.8 :</b> Illustration schématique d'un dispositif de chargement triboélectrique statique.....	37
<b>Figure I.9 :</b> Représentation schématique d'un dispositif de tribochargement à lit fluidisé.....	38
<b>Figure I.10 :</b> Illustration schématique des six régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation; $U_{mf}$ - vitesse minimale de 1 fluidisation; $U_{mb}$ - vitesse minimale d'apparition des boules; $U_t$ - vitesse de transport pneumatique.....	40
<b>Figure I.11 :</b> Illustration schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique.....	41
<b>Figure I.12 :</b> Dispositif de tribochargement par vibration de marque Retsch (modèle AS200 basic) .....	42
<b>Figure I.13 :</b> Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ; $L_{tube}$ : longueur du tube.....	43
<b>Figure I.14 :</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement triboélectrique par ventilateur.....	44
<b>Figure II.1 :</b> Les particules isolantes employées lors des expériences : (a) Polypropylène (PP) ; (b) Polystyrène (PS) ; (c) Polyéthylène (PE) .....	52
<b>Figure II.2 :</b> Formule chimique du PP.....	53

<b>Figure II.3</b> : La polymérisation du styrène.....	56
<b>Figure II.4</b> : La forme chimique et le schéma représentatif du polyéthylène.....	58
<b>Figure II.5</b> : Schéma descriptif de l'installation expérimentale.....	60
<b>Figure II.6</b> : Photographie du dispositif de charge par effet triboélectrique utilisé lors des expériences.....	60
<b>Figure II.7</b> : Méthode de mesure du potentiel de surface.....	62
<b>Figure II.8</b> : Schéma descriptif de la méthode de charge par décharge corona.....	62
<b>Figure II.9</b> : Dimensions de l'électrode cylindrique coaxiale en cuivre : (a) Dimensions de l'électrode corona coaxiale ; et (b) Photographie de l'électrode coaxiale.....	63
<b>Figure II.10</b> : La cage de Faraday : (a) Une image montrant la cage de Faraday employée dans l'ensemble des expériences ; et (b) Schéma explicatif du mécanisme de fonctionnement de la cage de Faraday.....	65
<b>Figure II.11</b> : Electromètre numérique de la marque Keithley modèle 6514.....	65
<b>Figure II.12</b> : Thermo Hygromètre / Anémomètre numérique Lutron (modèle AM-4205 A) .....	67
<b>Figure II.13</b> : Thermomètre à deux canaux (interface informatique RS-232) modèle (TM-915A) ...	68
<b>Figure II.14</b> : Sonde électrostatique utilisée lors des expérimentations.....	69
<b>Figure II.15</b> : Voltmètre électrostatique numérique de la marque Trek (modèle 347) .....	69
<b>Figure III.1</b> : (a) Temps de passage des particules à l'intérieur du tube ; (b) La vitesse à laquelle les particules traversent le tube.....	74
<b>Figure III.2</b> : (a) La température à l'intérieur du tube galvanisé de 1 m à 5 m à une température ambiante de tube = 20 °C ; (b) L'humidité à l'intérieur du tube galvanisé de 1 m à 5 m à une température ambiante de tube = 20 °C.....	75
<b>Figure III.3</b> : Les valeurs de la température et de l'humidité à l'intérieur du tube galvanisé avant et après chauffage du tube de 1 m à 5 m à une température de tube = 35 °C.....	75
<b>Figure III.4</b> : Les valeurs de la température et de l'humidité à l'intérieur du tube galvanisé avant et après chauffage du tube de 1 m à 5 m à une température de tube = 45 °C.....	76
<b>Figure III.5</b> : L'impact de la longueur du tuyau galvanisé sur le processus de tribocharge des granules de polyéthylène.....	77
<b>Figure III.6</b> : L'impact de la longueur du tuyau en PVC sur le processus de tribochargement des particules de polypropylène PP [RH = 30,6 % et T = 21,4 °C] .....	78
<b>Figure III.7</b> : L'impact de la longueur et de la température du tube métallique galvanisé sur la charge triboélectrique des particules de polypropylène [RH = 32-38,5 % et T = 20,4-20,9 °C] .....	80
<b>Figure III.8</b> : Le profil du potentiel de surface d'un échantillon de 30 g de granules de PP non chargés.....	80

<b>Figure III.9 :</b> Profil du potentiel de surface d'un 30 g de particules de polypropylène de 1 m à 5 m, pour une température de tuyau galvanisé = 20°C.....	81
<b>Figure III.10 :</b> Profil du potentiel de surface d'un 30 g de particules de polypropylène de 1 m à 5 m, pour une température de tuyau galvanisé = 35°C.....	82
<b>Figure III.11 :</b> Profil du potentiel de surface d'un 30 g de particules de polypropylène de 1 m à 5 m, pour une température de tuyau galvanisé = 45°C.....	83
<b>Figure III.12 :</b> Charge de saturation pour trois matériaux obtenus après l'avoir traversé plusieurs fois dans un tube galvanisé de 1m de long [RH = 43-44,5 % et T = 21,9-22,3 °C] .....	85
<b>Figure III.13 :</b> La variation relative de la charge triboélectrique.....	86
<b>Figure III.14 :</b> Résultats de prédiction obtenus en utilisant le modèle de Monte Carlo.....	87
<b>Figure III.15 :</b> Courbes de prédiction par "Machine-learning" (a) modèle séquentiel et (b) modèle d'entrée-sortie.....	88
<b>Figure III.16 :</b> La variation de la charge massique des granules de PP, PS et PE pour deux expérimentations distinctes en termes des conditions ambiantes dans le laboratoire, en fonction du nombre de passage (cas du tuyau galvanisé de 1 m de longueur) .....	89
<b>Figure III.17 :</b> Variation de la charge massique des particules de PE, PP et PS pour deux différentes expérimentations en termes des conditions ambiantes en laboratoire, en fonction du nombre de passages (cas du tuyau en PVC d'une longueur de 1 m) .....	90
<b>Figure IV.1 :</b> Accumulation de la charge triboélectrique sur des particules de polypropylène de 30 g acquise suite à des passages répétés à travers un tuyau en cuivre.....	96
<b>Figure IV.2 :</b> Résultats d'expérimentation et d'ajustement utilisant l'équation (IV.6) montrant l'impact de la charge initiale sur l'accumulation de la charge triboélectrique sur des particules de polypropylène de 30 g de poids passées à maintes reprises à travers un tuyau d'une longueur de 1 m : (a) Tube de cuivre avec différentes charges initiales négatives déposées par décharge corona ; et (b) un tube en PVC avec différentes charges initiales positives déposées par décharge corona.....	97
<b>Figure IV.3 :</b> Résultats d'ajustement montrant la constante de temps $\tau$ en fonction du rapport $Q_0/Q_s$ : (a) particules dans un tube en cuivre et (b) particules dans un tube en PVC.....	99
<b>Figure IV.4 :</b> Variation de la tribocharge à partir de la charge initiale déposée par décharge couronne de polarité opposée à la charge de saturation, (a), (b) tube en cuivre et (c), (d) tube en PVC.....	101
<b>Figure IV.5 :</b> Charge initiale obtenue par triboélectrification contre un tube en PVC puis passée dans le tube en cuivre : (a) la variation de la tribocharge depuis une charge initiale de polarité opposée jusqu'à la charge de saturation pour le cas d'un tuyau en cuivre ; et (b) les valeurs des constantes de temps qui leur correspondent.....	101
<b>Figure IV.6 :</b> Résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'influence de la charge initiale obtenue par décharge corona négative sur la charge de saturation d'un 30 g de particules de polypropylène soumises à plusieurs passages dans un tube galvanisé de 1 m [RH = 46,6 % et T = 19,3 °C] ; et (b) Représentant la constante de temps $\tau$ en fonction de $Q_0/Q_{sat}$ pour le cas d'un tube galvanisé d'une longueur de 1 m.....	103

<b>Figure IV.7 :</b> Résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'influence de la charge initiale obtenue par décharge corona positive sur la charge de saturation d'un 30 g de particules de polypropylène passées à plusieurs fois dans un tube galvanisé de 1 m [RH = 44,9 % et T = 19,1 °C] ; et (b) Représentant la constante de temps $\tau$ en fonction de $Q_0$ pour le cas d'un tube galvanisé de 1 m.....	103
<b>Figure IV.8 :</b> Charge initiale obtenue par triboélectrification par un tube en PVC puis passée dans le tube galvanisé de 1 m : (a) évolution de la charge triboélectrique à partir d'une charge initiale positive obtenue par un tuyau en PVC jusqu'à la charge de saturation [RH = 36,3 % et T = 21,6 °C] ; et (b) les valeurs des constantes de temps qui leur correspondent.....	104
<b>Figure IV.9 :</b> Charge initiale obtenue par triboélectrification par un tube galvanisé : (a) puis passée plusieurs fois dans un tube de cuivre de 1 m jusqu'à la saturation [RH = 34 % et T = 22,1 °C] ; et (b) puis passée plusieurs fois dans un tube en PVC de 1 m jusqu'à la saturation [RH = 55,2 % et T = 21,1 °C] .....	104
<b>Figure IV.10 :</b> Résultats expérimentaux représentant l'impact de l'accroissement de la quantité massique sur la charge de saturation dans le cas d'un tuyau en cuivre : (a) La charge de saturation en fonction de la masse de 5 g à 60 g ; et (b) La charge massique en fonction du nombre de passages.....	106
<b>Figure IV.11 :</b> Distribution du potentiel de surface à la surface des échantillons de 5 g à 60 g, pour le cas d'un tube en cuivre.....	107
<b>Figure IV.12 :</b> Résultats expérimentaux représentent l'effet de l'accroissement de la quantité massique sur la charge de saturation dans le cas d'un tuyau galvanisé : (a) Variation de la charge de saturation en fonction de la quantité massique de 5 g à 60 g ; et (b) Variation de la charge massique en fonction du nombre de passages.....	108
<b>Figure IV.13 :</b> Distribution du potentiel de surface à la surface des échantillons pesant de 5 g à 60 g, pour le cas d'un tuyau galvanisé.....	109
<b>Figure IV.14 :</b> Résultats expérimentaux représentent l'impact de l'élévation de la quantité massique sur la charge de saturation dans le cas d'un tube en PVC : (a) Charge de saturation en fonction de la quantité massique allant de 5 g à 60 g ; et (b) Charge massique en fonction du nombre de passages....	109
<b>Figure IV.15 :</b> Répartition du potentiel de surface à la surface des échantillons allant de 5 g à 60 g, pour le cas d'un tuyau en PVC.....	110
<b>Figure IV.16 :</b> Résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'impact de l'angle d'inclinaison du tuyau sur la charge de saturation de particules de polypropylène de 30 g de poids soumises à des passages répétés à travers un tube de cuivre de 1 m [RH = 55-64 % et T = 22-24 °C] ; et (b) Représentant la constante de temps $\tau$ en fonction de $Q_{sat}$ dans le cas d'un tuyau de cuivre d'une longueur de 1 m.....	112
<b>Figure IV.17 :</b> Résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'influence du type de particules sur la charge de saturation de 30 g de particules de polypropylène (PP), de polyéthylène (PE) et de polystyrène (PS) passées à plusieurs fois dans un tube galvanisé de 1 m [RH = 44 %, T = 22° C] ; et (b) Montrant la constante de temps $\tau$ en fonction de $Q_{sat}$ pour le cas d'un tube galvanisé de 1 m.....	113
<b>Figure IV.18 :</b> Les résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'effet du type de particules sur la charge de saturation d'un 30 g de particules de PP, PE et	

*PS passées à plusieurs fois dans un tube en PVC de 1 m [RH = 39,4 %, T = 23,3°C] ; et (b) Montrant la constante de temps  $\tau$  en fonction de  $Q_{sat}$  pour le cas d'un tube en PVC de 1 m.....114*

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Série triboélectrique faite par Bill Lee en 2009.....	32
<b>Tableau II.1</b> : Principales caractéristiques du polypropylène.....	54
<b>Tableau II.2</b> : Principaux domaines d'application du polypropylène.....	55
<b>Tableau II.3</b> : Principales caractéristiques physiques de PS.....	56
<b>Tableau II.4</b> : Principales propriétés des granulaires de PE utilisés.....	58
<b>Tableau II.5</b> : Caractéristiques de l'électromètre numérique de marque Keithley, modèle 6514 .....	66
<b>Tableau II.6</b> : Principales caractéristiques de la Balance électronique numérique "Ming Heng" Modèle MH-999.....	66
<b>Tableau II.7</b> : Caractéristiques principales du Thermo Hygromètre numérique Lutron (modèle AM-4205 A) .....	67
<b>Tableau II.8</b> : Principales caractéristiques du voltmètre électrostatique numérique Trek (modèle 347) .....	70
<b>Tableau III.1</b> : Charge de particules de polyéthylène (PE) vierges.....	76
<b>Tableau III.2</b> : Charge de granules de polypropylène (PP) vierges.....	78
<b>Tableau IV.1</b> : Paramètres et conditions expérimentales utilisés dans l'étude de l'impact de l'angle d'inclinaison sur la charge de saturation.....	111
<b>Tableau IV.2</b> : Les conditions expérimentales et les paramètres de l'étude de l'influence du type de particules sur la charge de saturation (le cas d'un tuyau galvanisé) .....	112
<b>Tableau IV.3</b> : Les paramètres et les conditions expérimentales utilisés dans l'étude de l'effet du type de particules sur la charge de saturation (le cas d'un tube de PVC) .....	114

# **INTRODUCTION GENERALE**

# Introduction générale

---

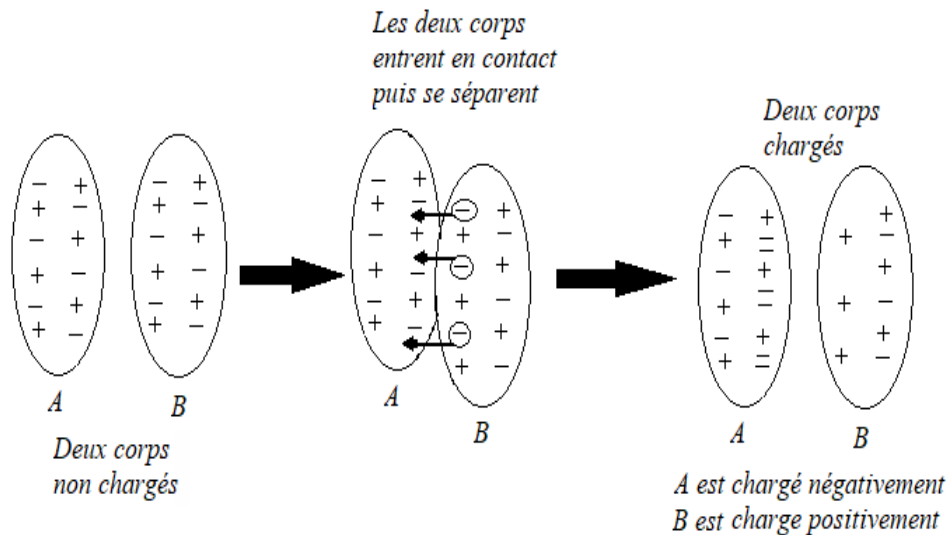
Toutes les matières, tous les objets et même l'air qui nous entoure sont constitués d'atomes. L'atome est constitué d'un noyau et des électrons tournent autour du noyau. Le noyau est situé au centre de l'atome et contient ce qu'on appelle de l'électricité positive (+) due aux protons, mais également des particules neutres (sans charge) appelées neutrons. Tandis que les électrons (qui tournent autour du noyau) sont chargés d'électricité négative (-).

En règle générale, la matière est électriquement neutre (c'est-à-dire ni positive ni négative), en raison de l'égalité entre le nombre de protons, qui possèdent une charge positive, et le nombre d'électrons, qui portent une charge négative et gravitent autour du noyau. La matière neutre peut se charger et cesser d'être neutre. La raison en est la présence d'électrons libres. Ces électrons libres se séparent de l'atome lorsque deux matériaux entrent en contact puis se séparent ; il en résulte ce qu'on appelle une charge électrique.

Lorsque deux matériaux entrent en contact puis se séparent, les électrons se déplacent d'un matériau à l'autre (**Figure 1**). Le matériau qui perd ses électrons libres devient chargé positivement parce que le nombre d'électrons dans l'atome est devenu inférieur au nombre de charges positives (protons) dans le noyau. Tandis que le corps vers lequel les électrons sont transférés devient chargé négativement, cela est dû au fait que le nombre d'électrons dans l'atome a dépassé celui de protons dans le noyau. Pour cette raison, lorsque deux objets entrent en contact puis se séparent, l'un acquiert une charge positive et l'autre une charge négative. Ce phénomène est appelé l'électricité statique. Par exemple, une personne qui marche sur le tapis avec des chaussettes et qui touche ensuite une poignée de porte peut ressentir un léger choc en touchant la poignée ; ceci est dû à l'électricité statique, ce qui est en réalité un phénomène très complexe, et bien que de multiples recherches et publications lui aient été consacrées, sa compréhension demeure encore incomplète.

D'une part, l'électricité statique est considérée comme une source de nuisance de gravité variable, depuis petits chocs électriques qui perturbent le corps humain jusqu'aux grandes explosions [1, 2]. L'électricité statique est présente en particulier dans les environnements industriels qui dépendent du transport de matériaux et de matières plastiques par le transport

pneumatique [3-6] via des canalisations de transport. D'autre part, l'électricité statique a été exploitée dans de nombreux domaines très importants, par exemple : les photocopieuses, les imprimantes, les pulvérisateurs de peinture et les peintures pour voitures, les filtres à air (notamment les précipitateurs électrostatiques) et le processus de dépoussiérage. L'électricité statique est également utilisée dans les théâtres et pour pulvériser des pesticides et des engrais.

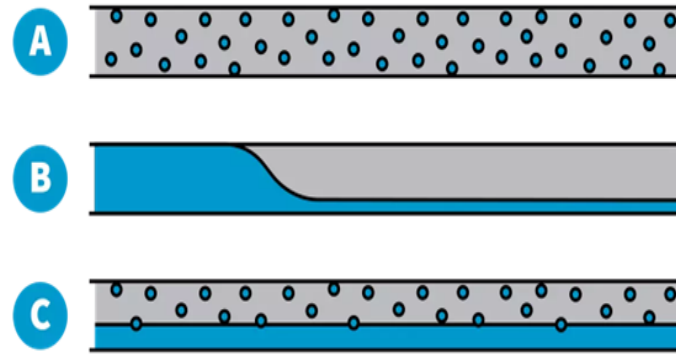


*Figure 1. Représentation schématique du phénomène de l'électricité statique.*

Les matériaux polymères sont considérés comme de très bons isolants électriques. Ils peuvent cependant aussi acquérir une charge électrique à leur surface par frottement avec un autre matériau, et ils sont en mesure de conserver cette charge longtemps. Récemment, leurs utilisations ont considérablement augmenté dans presque tous les secteurs, en particulier dans le secteur industriel. Les matériaux polymères isolants sont couramment employés dans les procédés de traitement des matériaux solides, ainsi que pour réaliser des recherches scientifiques relatives à l'étude du chargement triboélectrique.

Les matériaux solides en poudre ou granulés, ainsi que les produits alimentaires et les médicaments, sont transportés par les canalisations de transport pneumatique. Cela peut être fait sur une courte distance (quelques mètres), une moyenne distance (plusieurs mètres) ou une distance étendue (des centaines de mètres). Les tuyaux de transport pneumatiques peuvent être inclinés, verticaux ou horizontaux. La taille et le type de matériaux solides transportés dans les pipelines de transport sont les deux principaux facteurs qui contrôlent les longueurs et les diamètres des canalisations. Les matériaux visqueux tels que ceux saturés d'huiles et de graisses

ne conviennent pas aux systèmes de transport pneumatique, parce qu'ils peuvent bloquer les canalisations de transport [7]. Une phase de transport pneumatique signifie la façon de déplacement du matériau à l'intérieur des canalisations de transport. On retrouve trois phases (**Figure 2**) : la phase diluée (A), la phase dense (B) et la phase transitoire (C) [8].



*Figure 2. Les trois phases de transport pneumatique [8].*

Lors du traitement et du transport de matériaux solides dans les canalisations de transport pneumatique, plusieurs problèmes résultant de l'électricité statique des granules sont souvent observés, car l'électricité statique est générée en raison des interactions qui se produisent généralement entre les granules (ou particules) transportées et les parois des tuyaux (parois des pipelines de transport). L'électricité statique constitue souvent une source de désagréments, surtout dans les milieux industriels et les usines, en raison des dommages qu'elle provoque, pouvant conduire à des pannes d'équipements. Plus dangereux encore, elle peut provoquer des incendies et des explosions, particulièrement dans des environnements inflammables. Plusieurs études ont cherché à comprendre et à étudier le phénomène de l'électrostatique des convoyeurs pneumatiques de particules. Parmi ces études, on citera : [9-14]. Plusieurs facteurs peuvent affecter le phénomène d'électrification des particules lors du transport pneumatique, notamment : la rugosité de surface granulaire [15], la forme des particules [16-18], la taille des granules [16], la vitesse de mouvement des particules [18], la charge initiale et la quantité massique de particules [19]. En plus des facteurs mentionnés, d'autres facteurs tels que les conditions ambiantes, notamment l'humidité et la température, influencent le phénomène d'électrification des particules durant le transport pneumatique.

Malgré le fait que de multiples investigations aient été réalisées par les chercheurs et malgré les nombreux résultats obtenus, le phénomène de l'électrostatique des particules est encore mal compris. En 2019, Y. Zhao et al. [20] ont examiné l'impact de la rugosité de la surface granulaire sur le processus de génération d'électricité statique, en utilisant trois matériaux différents : le charbon, la sciure de bois et le biochar. Une attention particulière a également été accordée à l'effet d'autres facteurs de plus que la rugosité de la surface granulaire, qui sont la surface de contact des granules, la forme des granules et l'humidité relative. Ils ont constaté qu'à mesure que la surface de contact augmentait et que l'humidité diminuait, l'électrostatique augmentait. Ils ont également observé que les granules de forme triangulaire engendraient davantage de charges électrostatiques par rapport à ceux de forme rectangulaire. De plus, Y. Zhao et ses collègues ont découvert que l'électrostatique augmentait d'abord avec la rugosité des granules, puis diminuait après avoir atteint un point maximum. Ils ont également remarqué que l'électrostatique générée par les granulés de sciure de bois était plus élevée que celle générée par les granulés de biochar. En 2011, Khashayar Saleh et al. [21] ont étudié l'influence de la composition chimique du conduit de transport, de la vitesse de l'air, du débit des particules solides, de la taille des particules et de l'humidité relative sur la triboélectricité des particules fines de verre pendant leur transport par voie pneumatique. Deux types de matériaux de tubes ont été employés, à savoir le téflon et le nylon. Ils ont également utilisé deux types de formes de particules, sphériques et angulaires. Leurs résultats indiquent que les effets électrostatiques étaient plus significatifs pour les débits de solides plus élevés, les particules plus volumineuses, les vitesses d'air plus élevées et une humidité relative plus basse.

Parmi les problèmes les plus courants liés à l'électrostatique des particules lors du transport pneumatique, sont les explosions des équipements dans les installations industrielles. En 2017, Fabio Freschi et al. [1] ont analysé les causes de l'explosion de poussières de farine dans une usine industrielle. Tandis qu'en 2024, Wojciech Moroń et son collègue Wiesław Ferens [2] analysaient les risques d'incendies et d'explosions provoqués par des poussières industrielles contenant un pourcentage élevé de matières volatiles.

L'objectif principal de cette thèse est de mieux comprendre le comportement triboélectrique des matériaux polymères et d'étudier l'impact de différents facteurs sur la charge et son niveau de saturation. Ces facteurs comprennent, par exemple, la température et la longueur du tube, les conditions ambiantes (température et humidité), la charge initiale des particules, la quantité massique, l'angle d'inclinaison du tube, le type de particules. Il s'agit également d'étudier la possibilité de contrôler la charge résultant du frottement en contrôlant

les facteurs d'influence. Deux modèles ont également été réalisés pour prédire la tribocharge des particules en mouvement à l'intérieur des tuyaux galvanisés, à savoir le modèle de "Monte Carlo" et le modèle de "Machine Learning".

La présente thèse est structurée en quatre chapitres, qui sont présentés de la manière suivante :

**Le premier chapitre** présente une revue de la littérature portant sur l'état de l'art des recherches récentes concernant le phénomène triboélectrique. Nous allons d'abord présenter les connaissances fondamentales sur le processus du chargement par effet triboélectrique des matériaux isolants granulaires. Ensuite, nous allons fournir une explication détaillée des différents dispositifs utilisés dans le chargement triboélectrique des matériaux. De plus, les facteurs qui affectent le processus de chargement triboélectrique seront discutés.

Dans **le deuxième chapitre**, les divers matériaux, installations et dispositifs utilisés qui font l'objet de cette étude seront décrits. Nous allons également aborder les procédures expérimentales ainsi que les méthodes de mesure utilisées.

**Le troisième chapitre** présentera les résultats d'une étude sur l'effet de la longueur et de la température du tube galvanisé sur la charge accumulée à la surface des particules de polypropylène lors de leur passage à l'intérieur du tuyau. Ce chapitre présentera également une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits obtenus, en plus des résultats de l'impact des conditions ambiantes sur la charge des particules.

**Le quatrième chapitre** présentera les résultats de l'étude de l'influence de quelques facteurs sur le niveau de la charge de saturation d'un ensemble de particules millimétriques qui passe à travers un tuyau incliné. Ces facteurs comprennent : la charge initiale, la quantité massique, l'angle d'inclinaison du tuyau ainsi que le type de particules. Trois types de tuyaux utilisés sont considérés dans les résultats présentés dans ce chapitre, notamment : le tube de cuivre, le tube galvanisé et le tube en polychlorure de vinyle (PVC).

Le chargement triboélectrique est affecté par plusieurs facteurs. Le contrôle de ces facteurs nous permet de contrôler la charge résultant de ce phénomène, qui provoque de nombreux problèmes indésirables dans les milieux industriels, en particulier ceux inflammables. La **conclusion générale** fournira les **principales contributions** que la thèse apporte dans le domaine étudié, ainsi que les **perspectives** ouvertes par ce travail.

# **CHAPITRE I**

## **État de l'art de la Triboélectricité**

# Chapitre I

## État de l'art de la Triboélectricité

Lorsque on dit « chargement triboélectrique », nous faisons référence aux différents phénomènes pouvant conduire à la génération de charges électrostatiques à la surface des matériaux polymères isolants lorsque ces matériaux entrent en contact par frottement avec d'autres surfaces du même type ou d'un matériau différent (isolant-isolant ou isolant-conducteur). On retrouve ce phénomène un peu partout, en particulier dans le milieu naturel, dans les usines ainsi que dans les activités quotidiennes à domicile.

Récemment, le tribochargement est devenue très important dans plusieurs applications et il a également de nombreuses utilisations, surtout dans les domaines industriels. Cela a suscité la question du contrôle du phénomène de tribochargement, en cherchant les facteurs pouvant le diminuer ou ceux pouvant le favoriser, selon la situation.

Le phénomène triboélectrique, malgré les études qui ont été menées pour le comprendre et répondre aux questions soulevées à ce sujet, reste toujours mal compris en raison de divers facteurs qui entrent en jeu, par exemple : les conditions climatiques environnantes, le type de matériaux en contact et leurs caractéristiques. Ainsi, plusieurs études ont été menées afin de mieux cerner le phénomène de tribochargement. Parmi les études qui se sont concentrées sur l'étude du phénomène de on retrouve [\[22-25\]](#).

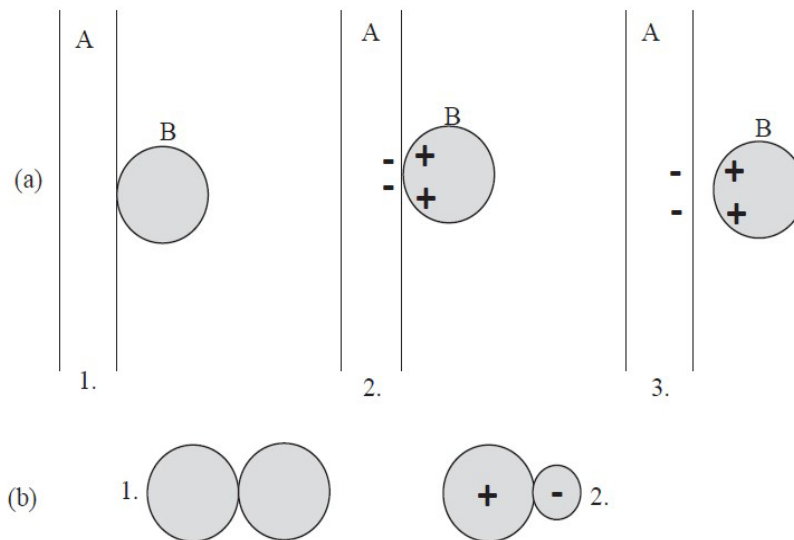
Ce chapitre comporte trois grandes parties. La première partie aborde en détail le chargement par effet triboélectrique. La deuxième partie montre les divers dispositifs de tribochargement. Alors que la troisième partie présente les divers facteurs susceptibles d'influencer le processus de chargement triboélectrique.

## I.1 Chargement par effet triboélectrique

Le terme "tribologie" trouve son origine dans le grec, plus précisément dans les mots "tribo" (τριβειν, *tribein*) signifiant "frotter", et "logie - logos" signifiant "étude" ou "science" [26]. En 1966, et pour la première fois, F. Bowden et D. Tabor [27] ont introduit des notions de physique des surfaces, ce qui a changé le domaine de la tribologie en le faisant évoluer vers l'étude des surfaces.

La charge triboélectrique, ou ce qui est également connu sous le nom de « électrisation par frottement », désigne le phénomène qui se manifeste quand deux surfaces neutres et différentes entrent en contact puis se séparent, pour que les charges électriques sont transférées d'une surface à l'autre. Il en résulte que les deux matériaux en contact sont chargés avec des polarités différentes (l'une positivement et l'autre négativement). Ce phénomène dépend principalement de la nature chimique des surfaces en contact [28, 29]. En 2013, Lu Liu et al. [30], dans leur étude sur l'électrification des matériaux polymères, ont observé que la charge électrique générée lors du contact s'accroît avec l'accroissement de la pression de contact et de la durée du frottement.

En fonction de la nature des matériaux en contact et de leur type, on peut diviser le phénomène de tribochargement des matériaux en deux catégories principales : le tribochargement des matériaux isolants et le tribochargement des matériaux conducteurs. Le phénomène du tribochargement des matériaux conducteurs est basé sur le transfert d'électrons entre les surfaces qui entrent en contact, et son mécanisme est bien reconnu, bien compris et universellement accepté, tandis que le mécanisme de tribochargement des isolants n'est pas encore entièrement expliqué et qu'il existe de nombreuses complexités et ambiguïtés autour du sujet [31]. Les études modernes se concentrent souvent sur l'étude du phénomène d'électrification des matériaux isolants.



**Figure I.1 :** Le chargement par effet triboélectrique et le transfert de la charge électrique entre deux surfaces en contact : (a) :1. La surface A est neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A est en contact avec la particule B ; 3. Après la séparation, la surface A présente une tendance à se charger avec une polarité négative, tandis que la particule B acquiert une charge positive ; (b) :1. Deux particules neutres de taille identique sont en contact ; 2. Les grosses particules ont tendance à être chargées positivement, tandis que les particules de petite taille ont une charge négative [32].

### I.1.1 Mécanismes physiques

Les mécanismes physiques qui génèrent des charges électriques à la surface des matériaux en contact par le chargement triboélectrique ou par frottement ne sont pas entièrement compris, car les contacts métal/métal et métal/isolant [33, 34] sont clairs et bien compris, tandis que pour le contact isolant/isolant [35, 36], est un cas complexe et ambigu.

En 1980, Lowell et Rose-Innes [37] ont mené une étude sur l'électrification par contact, dans laquelle ils ont montré qu'il existe des preuves expérimentales que la charge transférée entre la surface d'un deux isolants résulte du même mécanisme de base que la charge transférée entre un matériau isolant et un métal, ce qui montre que le transfert d'électrons est responsable du transfert de charge.

En 2008, McCarty et Whitesides [38] ont suggéré que la tribocharge des matériaux isolants était probablement due au transfert des ions.

En 2009, Liu et Bard [39] ont avancé l'idée que le transfert d'électrons constitue le principal mécanisme de transfert de charge entre deux matériaux isolants. La validité de cette

suggestion a été confirmée à travers la réalisation des expériences impliquant le chargement de Téflon.

Un certain nombre de chercheurs et de scientifiques ont examiné l'hypothèse relative au mécanisme de transfert d'électrons lors de la triboélectricité des matériaux isolants. En 1967 et 1969 Davies [35, 40] soutenait cette hypothèse. Cette hypothèse a également été soutenue par Fuhrmann [41, 42] en 1978 et 1977, où il a affirmé l'existence d'une relation linéaire entre la charge et le travail de sortie du métal.

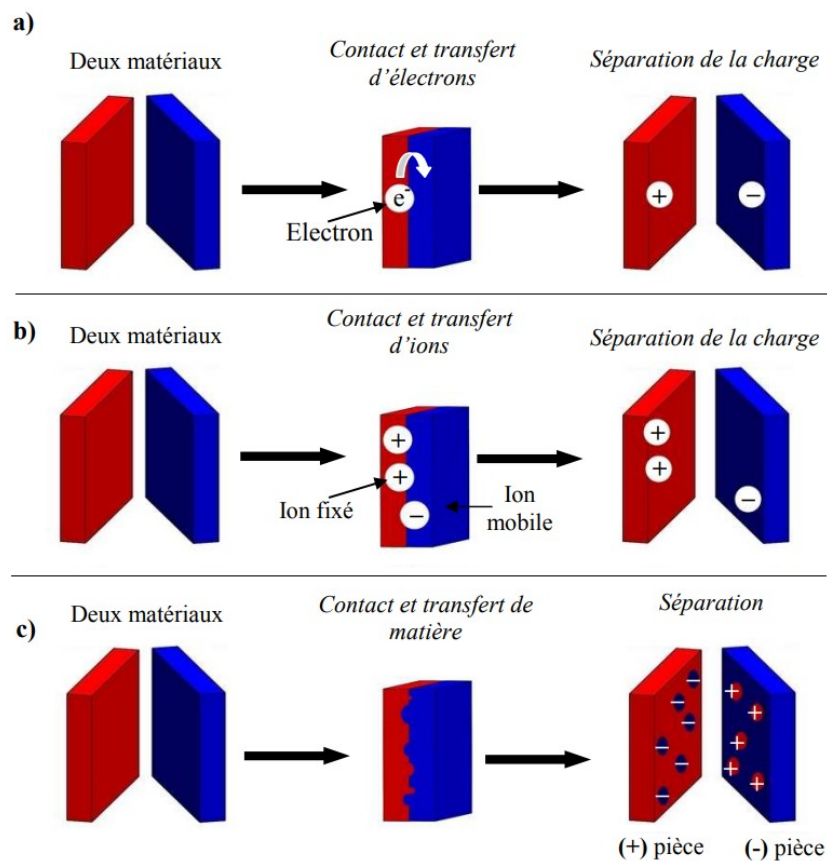
Akande et Lowell [43] ont remarqué le contraire en 1987, puisqu'ils ont découvert dans leur étude que le transfert de charge n'était pas corrélé au travail de sortie du métal de quelques polymères plastiques.

En 1993 et 1998, Diaz [44, 45] a fait une suggestion selon laquelle le mécanisme de transfert de protons pourrait être le mécanisme de transfert de charges pendant le phénomène de chargement triboélectrique d'une variété de matériaux isolants.

Les disparités observées dans les résultats des recherches réalisées par les chercheurs au sujet du mécanisme de transfert de charge entre les isolants suggèrent la présence d'autres mécanismes de transfert de charge lors du phénomène de chargement triboélectrique des matériaux isolants.

Certains des travaux menés par quelques chercheurs ont mis en lumière le mécanisme de transfert de matière, lequel pourrait servir d'explication au transfert de charges lors du contact entre deux matériaux isolants. En d'autres termes, il s'agit du transfert d'une infime portion de matière d'un corps à un autre corps en contact avec lui.

La charge peut être transférée entre deux matériaux en contact par le biais de trois mécanismes différents (**Figure I.2**) : soit par transfert d'électrons, soit par transfert d'ions, soit par transfert de matière [46-49].



*Figure I.2 : Les trois mécanismes possibles de transfert de charge entre deux matériaux en contact : a) Transfert d'électron ; b) Transfert d'ion ; c) : Transfert de matière [50].*

- **Transfert d'électrons**

En règle générale, lorsqu'il y a un contact entre deux surfaces métalliques, le transfert de charge électrique se produit en raison du mécanisme de transfert d'électrons. Ce phénomène est rendu possible par la présence d'électrons libres dans les métaux, qui peuvent se déplacer d'une surface à l'autre. Le mécanisme de transfert de charge lors du tribochargement entre deux matériaux isolants peut également inclure le transfert d'électrons entre ces deux matériaux. La structure électronique d'un isolant énergétiquement se constitue de multiples bandes. Au commencement, on retrouve une bande de valence, puis une bande de conduction, laquelle se trouve pleinement remplie d'électrons, entre ces deux bandes se situe ce qu'on appelle la bande interdite. Dans le meilleur des cas, il n'y a pas d'espace vacant susceptible d'être occupé par les électrons, et les électrons libres ne peuvent pas passer de manière spontanée de la bande de conduction à la bande de valence sans disposer d'une quantité suffisante d'énergie. Toutefois, presque tous les matériaux ne sont pas dans un état idéal, en raison de la possibilité que des

électrons soient emprisonnés dans la bande interdite [50]. En plus des électrons piégés dans la bande interdite, il est possible que des états d'énergie inoccupés se trouvent aussi dans cette même bande interdite [31].

D'après les études de Lowell et d'autres études menées par d'autres chercheurs [51-54], quand deux matériaux se touchent, les électrons de haute énergie qui sont emprisonnés à l'une des surfaces peuvent se passer vers un état d'énergie vide et plus faible sur l'autre surface. Lorsque les deux surfaces en contact se séparent, un transfert d'électrons s'opère d'une surface à l'autre, entraînant par conséquent un déséquilibre de charge sur ces deux surfaces.

- **Transfer d'ions**

Il existe de nombreuses études et chercheurs qui soutiennent que le mécanisme de transfert d'ions constitue une explication du transfert de charges lors du phénomène de chargement triboélectrique des matériaux isolants [55-58]. McCarty et Whitesides en 2008 [38], ainsi qu'une étude menée par Thomas et al. [59] en 2008, ont pu prouver que le déplacement d'ions est l'explication de la tribocharge des matériaux isolants, comme ils ont apporté la preuve grâce à leur utilisation d'une série d'électrets ioniques qui contiennent des ions mobiles. Dans une étude de Hogue et al. [60] en 2004 concernant la charge résultant du contact entre isolant-isolant et sa relation avec la pression atmosphérique, ils ont découvert que l'échange d'ions de surface pourrait constituer le mécanisme de transfert de charges lors du tribochargement entre ces matériaux isolants. Les conclusions de leur étude ont mis en évidence que la quantité des échanges de charges entre deux surfaces isolantes est étroitement dépendante, en grande partie, de la pression atmosphérique du gaz. Ils ont également observé que la quantité d'échange de charges entre les deux surfaces isolantes diminue à mesure que la pression atmosphérique diminue.

- **Transfert de matière**

Il y a aussi un autre mécanisme permettant d'expliquer le transfert de charges lors du tribocharge des matériaux isolants. Toutefois, ce mécanisme n'a pas été bien étudié et il n'y a pas beaucoup d'études concernant ce mécanisme. Ce mécanisme est désigné comme le mécanisme de transfert de matière, impliquant le déplacement d'une fraction minimale de matière d'un des deux corps en contact vers l'autre corps.

En 2018, Pandey et al. [61] ont discuté la possibilité du mécanisme de transfert de matière. Leur étude s'est concentrée sur la corrélation entre la quantité de charge transférée et la quantité de matière transférée d'une surface à une autre lors d'un contact entre ces deux surfaces, dans le but de démontrer l'existence du mécanisme de transfert de matière. Pandey et ses collègues ont observé un changement dans le degré de ductilité du polymère et de leur charge après un contact avec un autre matériaux. Leurs résultats ont montré que lorsque plus de matière est transférée, plus de charge est générée. Par conséquent, d'après les résultats de leur étude, il apparaît que le transfert de matière entre les isolants joue un rôle dans la génération de charges par le biais du frottement et du contact.

Baytekin et al. [62] en 2012, ont montré que même si de petites quantités de matière sont échangées lors du contact entre isolants, elles peuvent inverser la polarité des isolants.

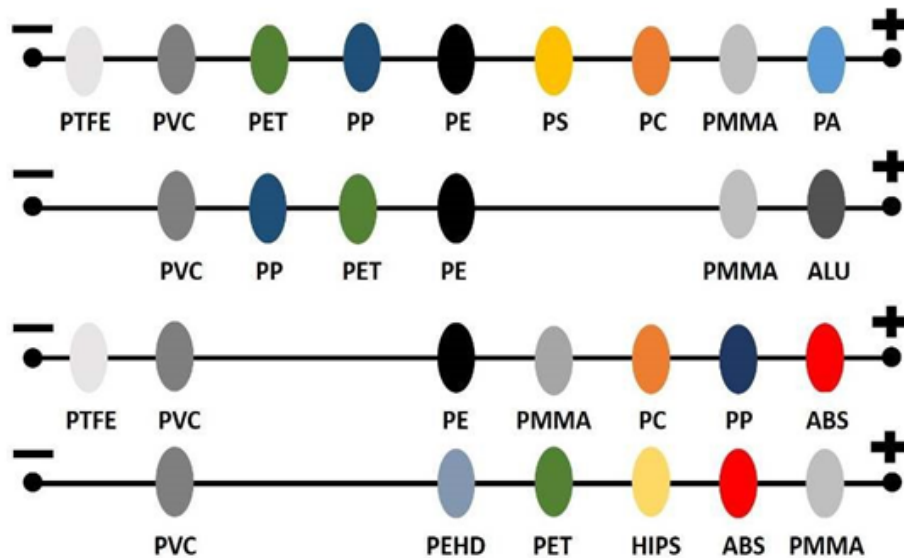
### I.1.2 Série triboélectrique

La série triboélectrique constitue une classification des divers matériaux en fonction de leur propension à se charger positivement ou négativement lorsqu'ils sont en contact avec d'autres matériaux. Plus les deux matériaux qui sont soumis au contact entre eux se situent à une distance considérable l'un de l'autre dans la série triboélectrique, plus la quantité de charge produite par leur friction ou par leur contact l'un avec l'autre est importante. Dans la partie médiane de cette série, se situent les matériaux qui acquièrent de charges faibles lorsqu'ils sont frottés avec d'autres matériaux. De nombreux chercheurs et auteurs ont proposé quelques séries. En 1759 Wilcke propose une série, tandis qu'en 1840 Faraday propose aussi une autre série. Également Jamin et Bouty en 1891 qui présentent presque la même série.

Shaw (1917) [63] a présenté une autre série, et elle est considérablement plus étendue que les autres séries. Cette série a fourni une description légèrement meilleure des échantillons utilisés. Shaw a utilisé l'électroscope afin de mesurer les charges présentes à la surface de divers matériaux qui avaient été chargés par le biais du frottement. Shaw a également examiné l'impact de la température susceptible de provoquer des inversions.

Les résultats obtenus sont affectés par les conditions expérimentales, en plus par d'autres facteurs. Étant donné que les conditions expérimentales diffèrent d'une expérience à l'autre, donc les facteurs externes peuvent simplement affecter les résultats et inverser les polarités

obtenues lors du contact entre matériaux. Donc, il est très difficile de créer une liste unique avec un ordre fiable. Ceci explique l'existence de séries triboélectriques diverses et variées.



*Figure I.3 : Série triboélectrique expérimentale pour divers matériaux plastiques employés dans l'industrialisation d'appareils informatiques et électriques [32].*

L'état de surface des corps frottés est certainement très important, car les séries triboélectriques changent d'un auteur à l'autre [32, 64]. Alors, il n'existe pas une série triboélectrique universelle. En 2009, une nouvelle série triboélectrique a été réalisée par Bill Lee [65], représentée dans le **Tableau I.1**.

Tableau I.1 : Série triboélectrique faite par Bill Lee en 2009 [32, 65-68].

Nom d'isolant	Rapport de la charge [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F : faible, N : normal)	Remarques
Polyuréthane solide	+40	+N	Un peu conducteur
Nylatron (nylon + MoS <sub>2</sub> )	+28	+N	/
Verre	+25	+N	Un peu conducteur
Papier	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Silicone	+6	+N	/
Coton	+5	+N	Un peu conducteur
Caoutchouc nitrile	+3	-F	/
Laine	0	-F	/
Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/
Acrylique (Poly méthacrylate de méthyle)	-10	-N	/
Époxy (circuit imprimé)	-32	-N	/
Caoutchouc en styrène-butadiène (SBR, Buna S)	-35	-N	/
PET (mylar) solide	-40	+F	/
Polystyrène	-70	-N	/
Polyamide	-70	-N	/
Silicone	-72	-N	/
Oléfines (alcènes) : LDPE, HDPE, PP	-90	-N	/
PVC (vinyle rigide)	-100	-N	/
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N	/
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140	-N	Un peu conducteur
Téflon	-190	-N	Très électronégatif

### I.1.3 Différentes applications du tribochargement électrostatique

La triboélectricité revêt une importance majeure dans l'industrie, ainsi que dans bien d'autres domaines. Elle est également considérée comme la base de plusieurs technologies dans l'industrie, et ses applications s'étendent à divers domaines, tels que : la séparation électrostatique [69-73] des mélanges de particules suite à leur chargement par triboélectrification constitue une technique très importante pour le processus de recyclage des polymères. La triboélectricité est utilisée aussi dans le nanogénérateur triboélectrique (TENG) [74] qui constitue un dispositif de récolte d'énergie transformant l'énergie mécanique en électricité par le biais de l'effet triboélectrique. Il a été présenté pour la première fois par le groupe de Zhong Lin Wang à l'institut de technologie de Géorgie en 2012 [75-78].

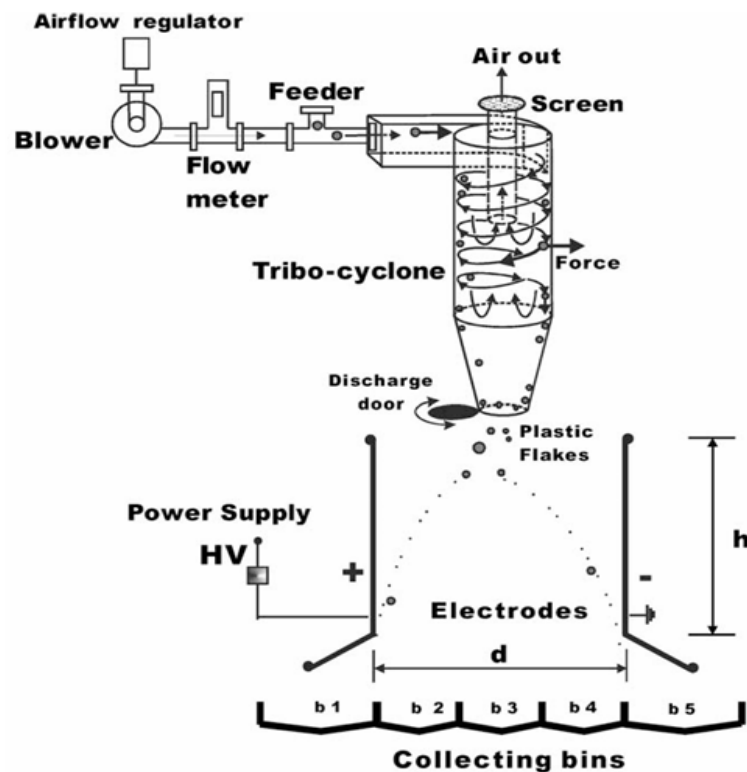
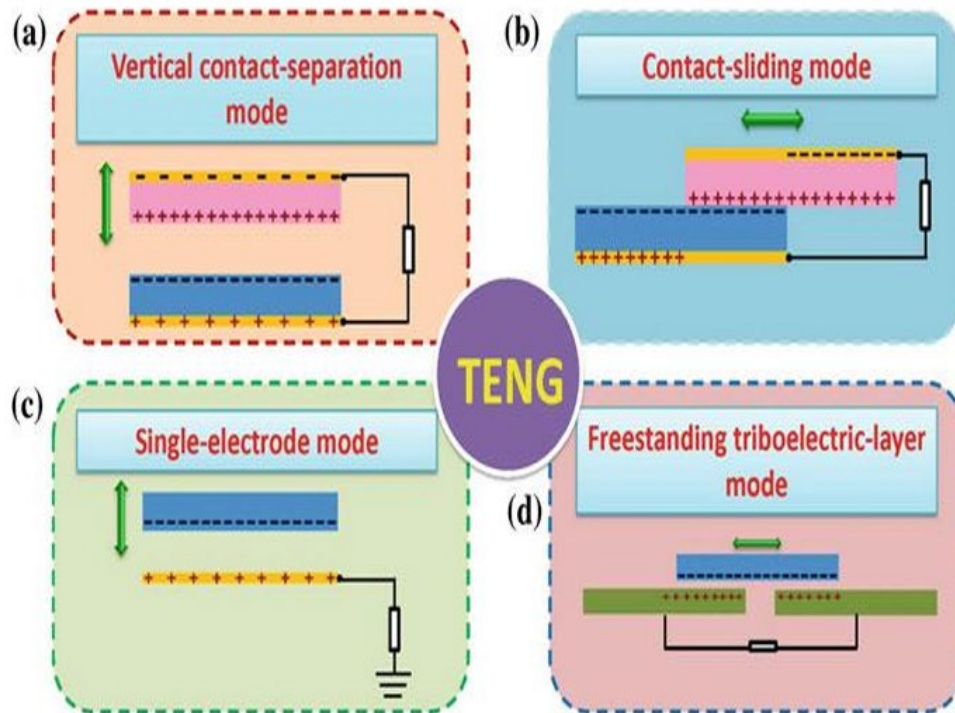


Figure I.4 : Conception schématique du séparateur triboélectrique [79].



*Figure I.5 : Modes opératoires des nano-générateurs triboélectriques : (a) Contact-séparation mode, (b) Sliding mode, (c) Single électrode mode et (d) Freestanding mode [80].*

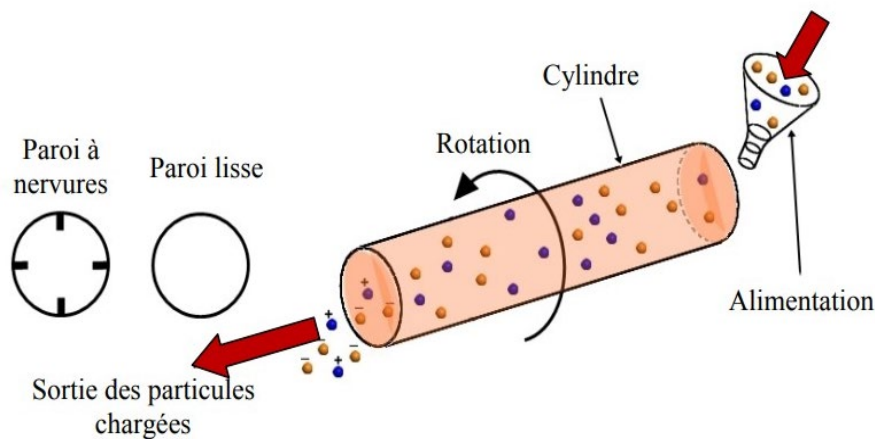
## I.2 Dispositifs de chargement triboélectrique

Afin de créer une charge triboélectrique à la surface des matériaux polymères granulaires, plusieurs méthodes différentes peuvent être utilisées. De nombreux différents travaux ont été publiés concernant ces procédés de tribochargement utilisant plusieurs dispositifs : lit fluidisé, cyclone, tribo-aéro-électrostatique, vibration verticale, cylindre rotatif, chargeur statique, des ventilateurs [81-89].

### I.2.1 Dispositif de charge à cylindre rotatif

L'utilisation du dispositif de chargement à cylindre rotatif remonte aux années 1990. Il s'agit d'un cylindre (ou tube) creux qui effectue un mouvement de rotation autour d'un axe horizontal ou légèrement incliné (**Figure I.6**). Le mélange des granules est mis en mouvement à l'intérieur du tube lorsque le cylindre est mis en rotation, dans lequel les particules passent à l'intérieur du tuyau par l'effet de la gravité et sortent de l'autre côté avec une charge électrique. Deux types de frottement se manifestent quand les particules passent à travers le cylindre : le frottement qui se produit entre les particules elles-mêmes ainsi que le frottement entre les

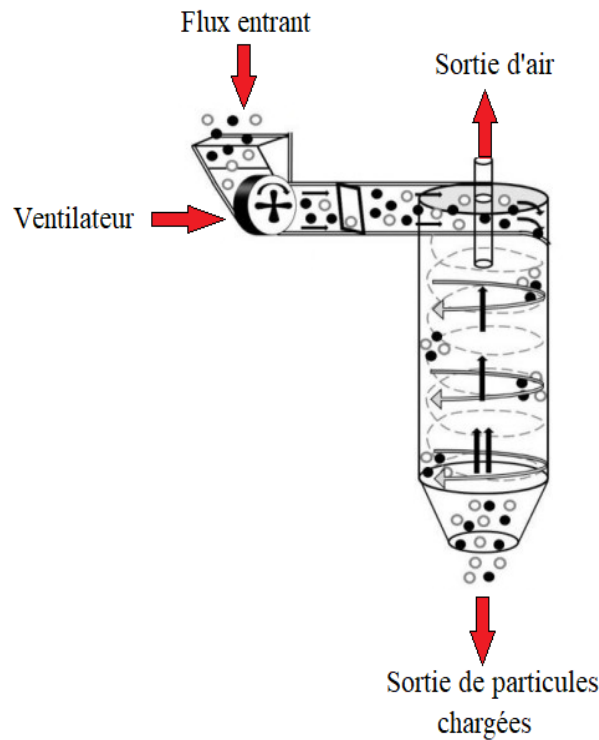
particules et la paroi interne du cylindre. La surface intérieure du cylindre (tuyau) est dotée d'ailettes fabriquées à partir du même matériau que celui du tuyau, dans le but d'accroître le nombre de collisions qui s'engendrent entre les particules elles-mêmes ainsi qu'entre les particules et la paroi interne du cylindre, pendant le transit des particules à l'intérieur du cylindre. Cela augmente le gain de charge par les particules par rapport à un cylindre avec une surface interne lisse [90-93]. Les avantages de ce dispositif sont sa simplicité et la facilité d'utilisation, ainsi que sa capacité à très bien charger les particules.



*Figure I.6 : Illustration schématique d'un dispositif de chargement triboélectrique utilisant un cylindre rotatif [50].*

## I.2.2 Dispositif de chargement par cyclone

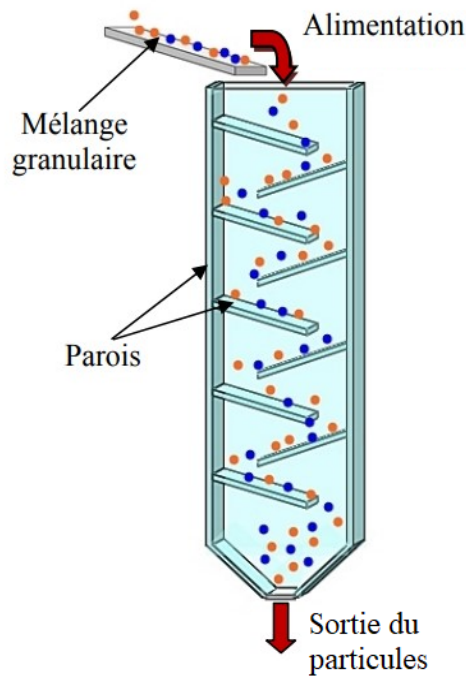
Le dispositif de chargement par cyclone comprend un cylindre isolant (**Figure I.7**), qui est placé en position verticale. Il contient aussi un ventilateur, avec une vitesse de rotation ajustable. Ce ventilateur a pour fonction d'assurer le soufflage des particules ainsi que des matériaux granulaires ou pulvérulents qui doivent être chargés dans le cylindre. Lors du passage des particules à travers le cylindre, elles entrent en contact avec la paroi intérieure du cylindre, ce qui entraîne un frottement constant entre les particules et la paroi. C'est ce frottement qui engendre la plupart de la charge que les particules acquièrent [94-96].



*Figure I.7 : Illustration schématique d'un dispositif de chargement triboélectrique par cyclone [31].*

### I.2.3 Dispositif de chargement statique

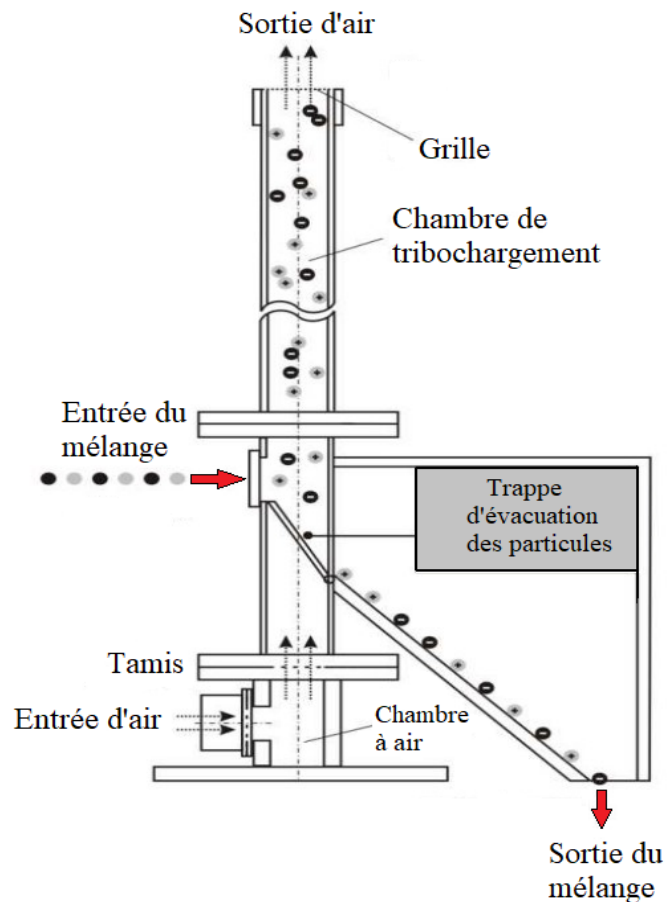
Le dispositif de chargement triboélectrique statique se présente sous la forme d'un récipient parallélépipédique conçu à partir d'un matériau isolant (**Figure I.8**), à l'intérieur de ce récipient (conteneur), on trouve de nombreuses parois (plaques) inclinées et amovibles. Au sein de ce dispositif, les particules chutent de manière verticale et glissent sous l'influence de la force de gravité, qui les attire vers le bas. Les particules obtiennent leurs charges par le biais de la friction avec les plaques isolantes inclinées qui se trouvent à l'intérieur de l'enceinte (récipient) et qui sont généralement interchangeables [85, 97, 98].



*Figure I.8 : Illustration schématique d'un dispositif de chargement triboélectrique statique [50].*

#### **I.2.4 Dispositif de charge à lit fluidisé**

Le dispositif de chargement à lit fluidisé se compose essentiellement d'un tube cylindrique en matériau isolant (**Figure I.9**). À l'extrémité inférieure de ce tube se trouve une plaque poreuse sur laquelle est déposé un mélange de matériaux granulaires ou pulvérulents. Afin d'obtenir un lit fluidisé, on utilise une soufflante à vitesse contrôlée pour injecter de l'air à travers la plaque poreuse inférieure. Cette fluidisation des particules est due à l'ascension de l'air. En raison des interactions qui se produisent généralement entre particules-particules et entre les particules et les parois intérieures du cylindre isolant, ces particules se trouvent chargées électriquement de signes opposés [69, 83, 84, 87, 99].



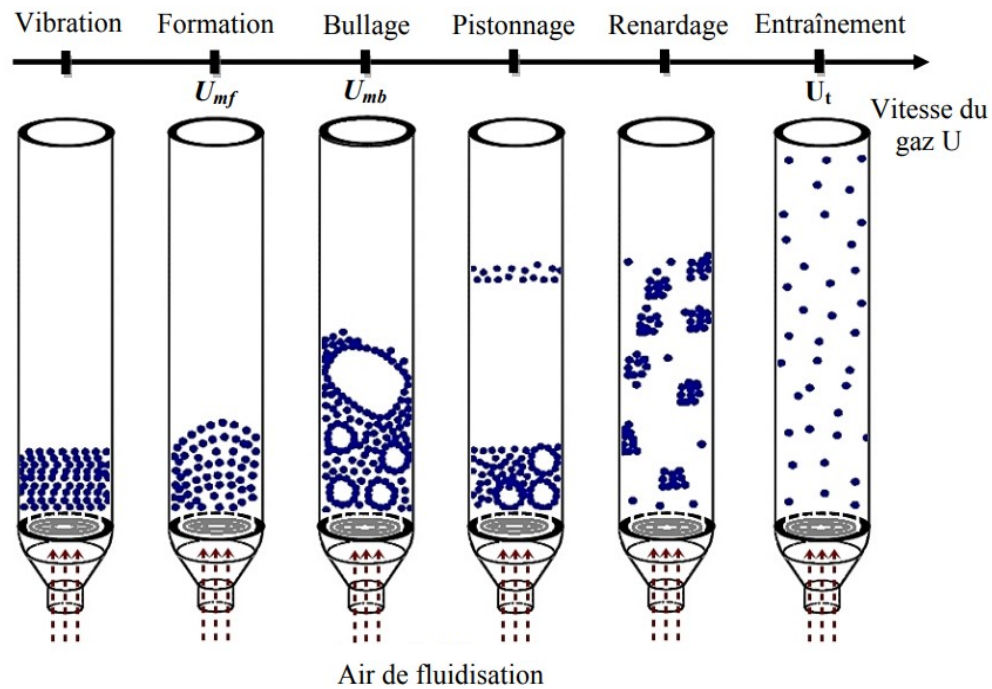
*Figure I.9 : Représentation schématique d'un dispositif de tribochargement à lit fluidisé [67, 100].*

C'est la méthode la plus couramment employée pour le tribochargement des particules. La **Figure I.10** montre les six régimes de fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs [101].

- **La vibration** : Cette étape est considérée comme la première étape du processus de chargement triboélectrique dans les dispositifs à lit fluidisé. Grâce aux faibles vitesses de l'air, les particules qui composent une couche sur la plaque poreuse demeurent immobiles, sans aucun mouvement apparent. Les vibrations des particules deviennent plus prononcées lorsque la vitesse de l'air est élevée.
- **La formation** : Pendant cette étape, le lit immobile de couche de particules entame un processus de fluidisation (présenter des caractéristiques fluidiques comme les ondulations, la formation de microbulles et une certaine viscosité...), qui conduit à une évolution vers un état fluidisé (cela permet d'atteindre la transition entre l'état

stationnaire et l'état fluidisé du lit de particules). Par ailleurs, le lit manifeste une extension de la couche en raison d'une vitesse de l'air en surface égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation  $U_{mf}$ .

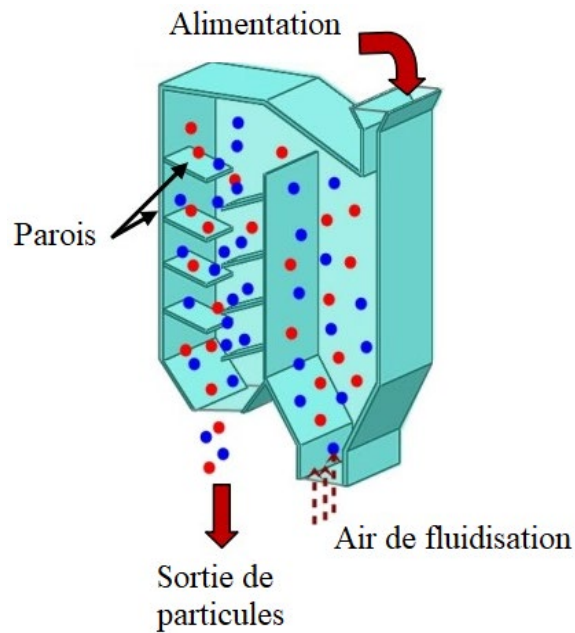
- **Le bullage** : La fluidisation dans la phase du "lit à bulles", qui s'accompagne de bulles se formant en bas du cylindre, précisément au niveau de la plaque poreuse de distribution de gaz. Ces bulles ont la capacité de se rassembler mutuellement pour former des courants gazeux. Le lit devient donc efficace et se distingue par ses impacts forts.
- **Le pistonage** : En excédent au-delà de  $U_{mb}$ , les bulles présentent désormais un diamètre comparable à celui du cylindre. Il y a une alternance dans le lit de passage de grandes bulles et de lit stationnaire. La surface du lit présente des mouvements très réguliers en termes d'élévation et d'abaissement.
- **Le renardage** : À cette étape, les particules s'adhèrent l'une à l'autre, créant ainsi des voies préférentielles pour le gaz.
- **L'entraînement** : Ce phénomène se produit au moment où la vitesse du gaz est quasiment équivalente à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos, désignée par  $U_t$ . Toutes les particules sont donc évacuées hors de la chambre de fluidisation.



*Figure I.10 : Illustration schématique des six régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation;  $U_{mf}$  - vitesse minimale de la fluidisation;  $U_{mb}$  - vitesse minimale d'apparition des boules;  $U_t$  - vitesse de transport pneumatique [50].*

### I.2.5 Dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique

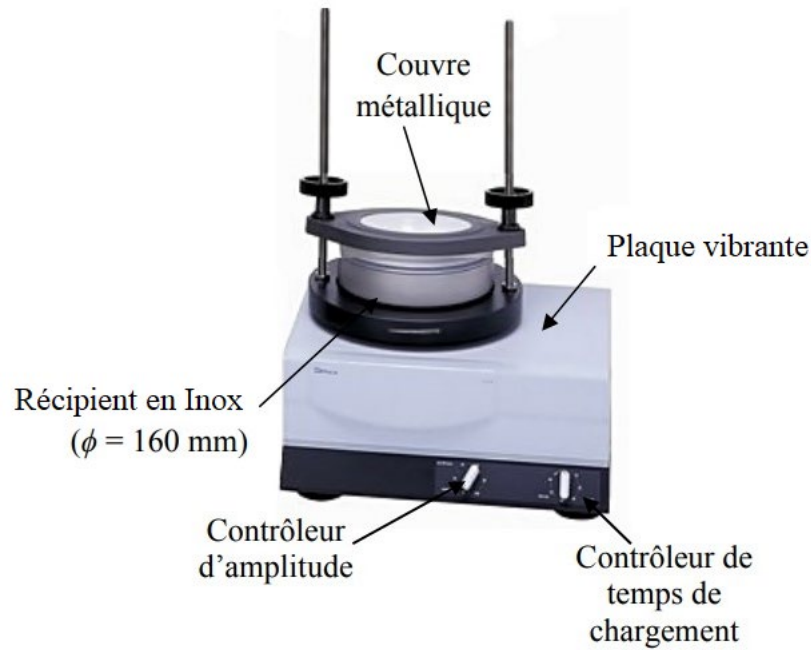
Le dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique est constitué de deux phases successives de chargement, telles qu'illustrées dans la **Figure I.11**. La première étape est spécialement élaborée pour le chargement aéro-triboélectrique (au sein d'un lit fluidisé), facilitant ainsi l'agitation des particules dans le lit fluidisé et permet une première mise en charge. Après cela, l'air déplace les particules vers la deuxième étape (à savoir le chargeur statique), afin qu'elles soient à nouveau chargées par le biais du frottement avec les parois inclinées présentes au sein du chargeur statique. Cela permet un meilleur contrôle de la charge acquise par les particules [97].



*Figure I.11 : Illustration schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique [50].*

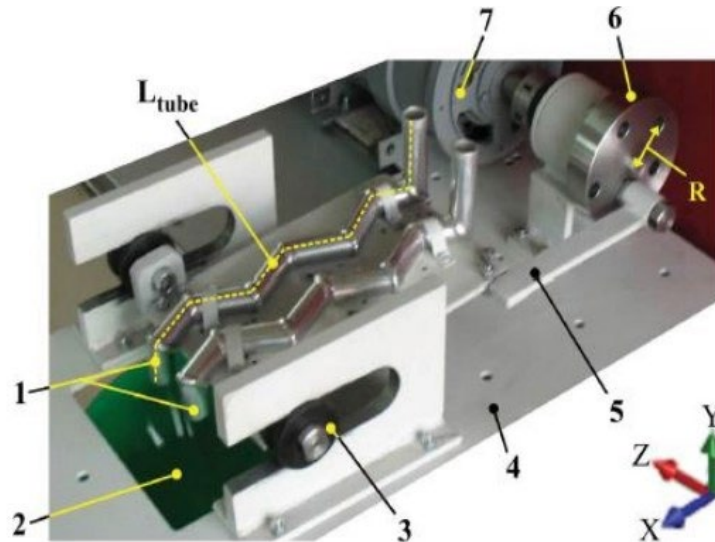
## I.2.6 Dispositif de chargement par vibrations

Il existe une autre méthode pour charger les particules qui consiste à recourir à un dispositif à vibrations de la marque Retsch (modèle AS200 basic) (**Figure I.12**). Ce système se compose d'un récipient en acier inoxydable fixé sur une plaque vibrante. Les particules à charger au-dedans du récipient vibrent en raison du transfert des vibrations de la plaque vibrante au récipient et donc aux particules. Cela permet d'obtenir une charge électrique par les particules grâce à leur contact avec les parois du récipient ainsi que les collisions entre les particules elles-mêmes. Divers facteurs ont une incidence sur la quantité de la charge triboélectrique que les particules acquièrent : la durée du processus de chargement, la nature du matériau du récipient, la quantité de particules qui doit être chargée ainsi que l'amplitude des oscillations du dispositif [88, 102, 103].



*Figure I.12 : Dispositif de tribochargement par vibration de marque Retsch (modèle AS200 basic) [50].*

Blajan et al. [81] ont mis au point un autre dispositif permettant de charger les particules par le biais de vibrations, comme illustré dans la **Figure I.13**. Le dispositif est composé de tubes en forme de zigzag montés sur une plaque métallique, le matériau granulaire ou pulvérulent est chargé en glissant dans les canaux en zigzag (tubes en zigzag) qui sont soumis à un mouvement vibrant [104, 105] le long des axes X et Y. En utilisant un moteur électrique et un système bielle-manivelle, il est envisageable de contrôler les oscillations du dispositif de charge. De plus, en ajustant la vitesse du moteur, il devient alors possible de moduler le mouvement oscillatoire du dispositif. Ce dispositif a une préférence pour charger les particules à travers des contacts entre les particules et la paroi.

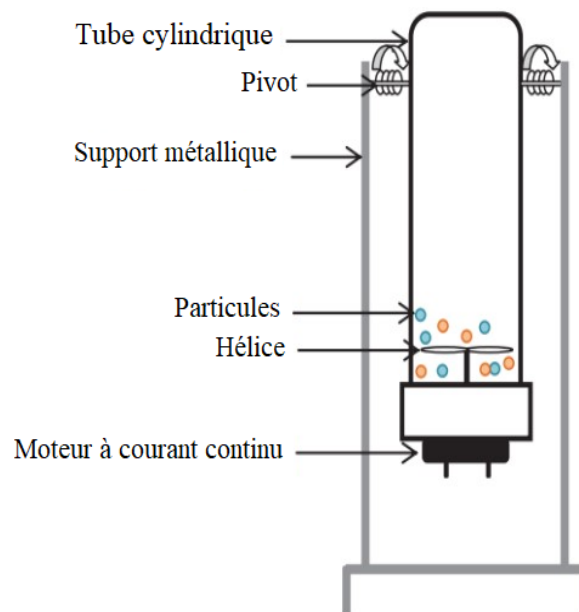


*Figure I.13 : Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ;  $L_{\text{tube}}$  : longueur du tube [66].*

### I.2.7 Dispositif de charge par ventilateur

Ce dispositif se compose essentiellement d'un tuyau cylindrique isolant équipé d'une hélice coaxiale, ainsi que d'un moteur électrique à courant continu à vitesse variable, responsable d'animer à la fois l'hélice isolante et le support métallique. Cette configuration est illustrée dans la **Figure I.14**. La rotation de l'hélice isolante crée un flux d'air ascendant, ce qui entraîne à son tour des turbulences aérodynamiques hélicoïdales à l'intérieur du tube qui contient le mélange de particules. Cette perturbation entraîne une augmentation du nombre de collisions entre les particules au-dedans du cylindre. Initialement, les particules granulaires isolantes sont insérées dans le dispositif de tribochargement, après quoi le moteur à courant continu est démarré, où nous contrôlons sa vitesse et la période de chargement. Les particules commencent à se déplacer à l'intérieur du cylindre grâce à l'air ascendant, ce qui leur permet de subir une triboélectrification à travers deux sortes de collisions distinctes : les collisions des particules contre les parois du cylindre, ainsi que les collisions des particules les unes entre elles. Une fois que le chargement des particules est terminé, le mélange de particules chargé est restauré tandis que les hélices sont toujours en rotation. Cette procédure implique de faire tourner le cylindre du dispositif sans l'arrêt du fonctionnement du moteur, dans le but de vider toutes les particules chargées et d'éviter qu'elles adhèrent aux parois du cylindre. Le choix du matériau constituant le cylindre revêt une importance capitale lors du processus de chargement

des particules. Effectivement, le choix du matériau du cylindre est important en tenant compte de la nature du mélange à charger [89, 106, 107].



*Figure I.14 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement triboélectrique par ventilateur [66].*

### I.3 Facteurs influençant le processus de chargement triboélectrique

Le chargement des matériaux isolants par effet triboélectrique constitue en réalité un phénomène d'une grande complexité, et sa complexité est attribuable à l'impact de divers facteurs. Parmi les facteurs importants, on peut citer : la nature cristalline des matériaux, la nature du contact entre les matériaux (qu'il s'agisse de friction ou de glissement), l'intensité de la force de contact, la durée du contact entre les matériaux, la composition chimique des surfaces en contact, les conditions atmosphériques environnantes, la rapidité de contact entre matériaux, les dimensions des matériaux en contact, la charge initiale des particules (ou granules), la longueur, le diamètre et la température des tuyaux de chargement, la masse et la quantité des particules, la rugosité de la surface de contact, les caractéristiques hydrophiles ou hydrophobes des matériaux, la zone de contact, et bien d'autres encore. Les paragraphes suivants exploreront diverses découvertes de la littérature concernant l'effet des divers facteurs sur le tribochargement des matériaux isolants.

### I.3.1 Influence de la force de contact

L'intensité de la force de contact appliquée lors du frottement entre deux polymères détermine la quantité de charge électrique engendrée par ce frottement, là où elle est directement proportionnelle à celui-ci. Plus cette force de contact s'intensifie, plus la charge électrique générée est importante. Cependant, il est à noter qu'une fois que la force de contact de chaque matériau atteint seuil spécifique, la quantité de charge électrique accumulée par le matériau se stabilise et n'augmente plus. Les irrégularités présentes sur la surface se caractérisent par leur faible interactivité et présentent des comportements qui sont linéairement dépendants de la force appliquée, surtout lorsque les forces de contact sont peu importantes. D'un autre côté, quand on applique sur une surface une forte force de contact, on crée également une pression de contact élevée sur ladite surface, et en raison de la déformation du matériau polymère isolant, un caractère de frottement différent est apparu [108].

### I.3.2 Influence de la durée du contact

Lorsque deux matériaux polymères se frottent, cela produit une charge électrique à la surface de ces matériaux. Cette charge devient plus considérable, lorsque le temps de frottement (c'est-à-dire la durée du contact) est prolongé. Le niveau de charge des matériaux atteint sa saturation au bout d'un laps de temps déterminé, et selon les propriétés spécifiques de chaque matériau, ce niveau de saturation de charge diffère d'un matériau à l'autre [109]. En 2005 N.K. Myshkin et al. [110], dans leur étude sur la tribologie des polymères, ils ont découvert que comme le PTFE étant un matériau viscoélastique, la durée de frottement et la température jouent donc un rôle essentiel dans la déformation de ce matériau. Au fur et à mesure du temps, et soumis à une force constante, la surface de contact des matériaux polymères isolants s'élargit de manière progressive. L'allongement de la durée de contact entraîne un accroissement de la zone de contact réelle, dans certains seuils, ainsi, il est inévitable que la charge transférée pendant le frottement entre deux matériaux s'accroisse.

La déformation des surfaces des matériaux isolants en polymère est surtout impactée par la durée pendant laquelle le frottement se produit [110].

### I.3.3 Influence de la taille des particules

La quantité de charge transférée entre deux particules lors de leur contact est directement influencée par la taille de celles-ci. Diverses études scientifiques [111, 112] ont été menées pour

approfondir la compréhension de l'impact de la taille des particules sur le processus de génération des charges triboélectriques. D'après ces études effectuées, il a été démontré que, dans le cas où les particules sont de petite taille, la quantité de charge produite lors du frottement est plus importante. Dans une étude menée en 2013 par Wu, Guiqing et al. [91], ils ont mis en évidence l'influence de la taille des particules en plastiques sur le tribochargement, ils ont constaté que les particules de petite taille acquièrent une charge électrique plus rapidement que les particules de grande taille. D'autres études [113, 114] ont également indiqué que lorsqu'un ensemble de particules de même nature mais de tailles différentes sont frictionnées triboélectriquement les unes contre les autres, celles de taille inférieure deviennent chargées négativement, alors que les particules de taille supérieure deviennent chargées positivement.

### **I.3.4 Influence de la forme des particules**

La forme des particules influence le phénomène de tribochargement de manière significative, qui n'est pas moins importante que l'effet d'autres facteurs. Dans des études menées par [115, 116], on a trouvé que les particules cubiques présentent une surface de contact plus importante avec le plan, ce qui entraîne un mouvement de glissement plutôt que de roulement, tandis que ce sera le contraire dans le cas d'une particule sphérique. Dans une autre étude [117], ils ont comparé les granules semi-cylindriques et les granules rectangulaires et ont constaté que le granule rectangulaire produisait moins de charge que le granule semi-cylindrique. Dans une autre étude menée en 2006 par J. Yao et al. [118], ils ont noté que les particules de forme angulaire présentent un transfert de charge plus important et que les particules longues et pointues tendent habituellement à accumuler davantage de charge. J. Yao et al. [17] ont réalisé une autre étude en 2014 portant sur des granules de PVC ayant une forme triangulaire et trapézoïdale, durant laquelle ils ont découvert que les granules triangulaires généraient une charge électrostatique plus importante lors de leur glissement.

### **I.3.5 Influence de la rugosité de surface**

La rugosité de la surface a un impact sur les zones de contact des polymères. Coste et Pechery [119] ont mené des expériences sur des échantillons de films en PET dans le but d'étudier l'effet de la rugosité de surface sur la charge triboélectrique. Les résultats de l'étude ont révélé que la densité de charge s'accroissait quand la rugosité de surface du polymère était diminuée. Tandis que d'autres études [120-122] ont trouvé le contraire, car elles ont montré que la rugosité de la surface joue un rôle significatif dans l'amélioration du comportement

triboélectrique, en révélant que les particules rugueuses accumulent davantage de charges que leurs homologues lisses, c'est dû au fait que les particules lisses ont un potentiel de surface beaucoup plus faible que les particules rugueuses. La surface rugueuse a un impact sur la zone de contact, ce qui aura donc une influence sur le transfert de charge.

### **I.3.6 Influence de la structure et la composition chimiques**

À cause des différences dans leur composition chimique, le chargement triboélectrique varie d'un matériau polymère à l'autre. Les propriétés physico-chimiques des surfaces des polymères peuvent avoir un impact sur la charge triboélectrique. Des études antérieures ont démontré que les éléments chimiques, comme le :  $\text{NH}_2$ ,  $\text{OCH}_3$ ,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}$ , abandonnent les électrons, ce qui entraînant l'apparition d'une charge positive à la surface. Par contre, certains groupes chimiques, tels que :  $\text{Cl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{I}$ ,  $\text{COCH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , attirent les électrons, ce qui entraîne une charge de surface négative [123].

### **I.3.7 Influence de l'humidité relative**

La charge triboélectrique est fortement influencée par l'humidité relative. Les matériaux polymères sont plus conductifs électriquement lorsque l'humidité est présente. En 2000, Greason [124] a réalisé une étude où il a révélé qu'une augmentation de l'humidité relative de 10 % à 70 % peut conduire à une diminution de la charge nette générée entre une bille en acier inoxydable et d'autres matériaux isolants, comme : le nylon, le polytétrafluoroéthylène (PTFE), le polycarbonate ainsi que le verre. Naik et al. [125] ont constaté en 2015 qu'une augmentation de l'humidité relative ambiante provoquait une diminution de la charge des particules polymères. En revanche, une étude réalisée en 2004 par M. Lungu [126] a montré que l'accroissement de l'humidité relative avait pour effet d'accroître la charge générée sur les particules de polyéthylène (PE) et de polystyrène (PS).

En fait, les résultats obtenus concernant l'impact de l'humidité relative sur le tribochargement présentent des disparités. D'après certaines études, ils ont conclu que la charge triboélectrique croît en fonction de l'accroissement de l'humidité relative [127], tandis que d'autres études montrent le contraire, autrement dit, que la charge triboélectrique diminue à mesure que l'humidité relative augmente [128, 129].

## I.4 Problématique du phénomène de chargement triboélectrique

Bien qu'il existe de nombreuses études et recherches sur le phénomène de chargement triboélectrique et l'électricité statique, ce phénomène reste toujours peu compris. La raison pour laquelle la triboélectricité n'est pas complètement comprise est le grand nombre de facteurs qui influencent ce phénomène, rendant son contrôle difficile ; cette difficulté à contrôler ce phénomène augmente les risques associés, notamment dans les environnements industriels. Ces risques vont des problèmes liés aux pannes des équipements et des appareils aux risques considérables, tels que les incendies et les explosions [130, 131], en particulier dans des endroits inflammables. Il pourrait même y avoir des pertes humaines, notamment dans les usines qui contiennent des matières et des produits inflammables.

En 2015, Hung-Cheng Chou et ses collègues [132] ont publié un article dans lequel ils ont évoqué un incendie résultant d'une explosion qui résultait de l'électricité statique, survenu en 2010 dans une usine pour la production de polypropylène (PP) et de feuilles de cuivre à Taïwan. Une fuite d'acétone liquide a provoqué l'incendie et l'explosion, et a provoqué la mort d'une personne et la blessure de cinq autres, et des dommages matériels ont été estimés à environ 20 millions de dollars américains. L'incendie d'origine a éclaté dans la zone de traitement du polypropylène au rez-de-chaussée, tandis que le réservoir d'acétone était au troisième étage. Une fois l'enquête menée sur le site de l'incendie, il a été constaté que le liquide d'acétone a fui et est tombé des fissures du sol et du tunnel vers la zone de traitement du polypropylène. Étant donné que le processus de fabrication de polypropylène génère de l'électricité statique, les liquides inflammables ont touché la source d'inflammation, provoquant l'explosion et l'incendie.

Pour éviter et/ou réduire les risques de triboélectricité et d'électricité statique, notamment dans les usines de traitement des solides et des poudres, des mesures de sécurité doivent être prises pour protéger les équipements et le personnel. Le contrôle des facteurs affectant la triboélectricité peut contribuer à contrôler et à réduire ces risques.

Parmi les solutions possibles, on peut citer [133] :

- La mise à la terre des équipements.
- La mise à la terre du personnel, on utilise des chaussures antistatiques, mais cela ne fonctionne que lorsque les sols de travail sont également antistatiques.
- L'utilisation d'ioniseurs et d'additifs antistatiques.
- Les études et modifications de procédés.

- La formation et l'éducation.

## Conclusions

Ce chapitre comprend des éléments importants nécessaires à la compréhension des travaux présentés dans les chapitres ultérieurs. Dans le cadre de ce premier chapitre, nous avons exposé un aperçu détaillé du processus de chargement triboélectrique des polymères isolants ainsi en mettant en lumière l'ensemble des aspects liés à ce phénomène physique complexe. À partir de là, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le chargement triboélectrique est un phénomène physique qui se manifeste lorsque deux matériaux isolants entrent en contact et frottent l'un contre l'autre, ou d'un contact entre isolant/conducteur. Ce phénomène complexe est influencé par une multitude de facteurs.
- Il existe divers dispositifs de chargement triboélectrique qui peuvent être utilisés pour analyser le processus de triboélectrification des polymères. Les disparités entre ces dispositifs entraînent des résultats différents d'un dispositif à l'autre.
- La charge triboélectrique est affectée par divers facteurs. Parmi ces facteurs, on peut citer : les conditions environnementales (comme l'humidité et la température), les dimensions, la forme et la nature des particules, la durée du contact entre les surfaces, la rugosité de la surface en contact, la force de contact, la composition chimique des matériaux en contact (notamment les polymères), ainsi que d'autres facteurs internes et externes.

**CHAPITRE II**  
**Installations et Méthodes**  
**Expérimentales**

# Chapitre II

## Installations et Méthodes Expérimentales

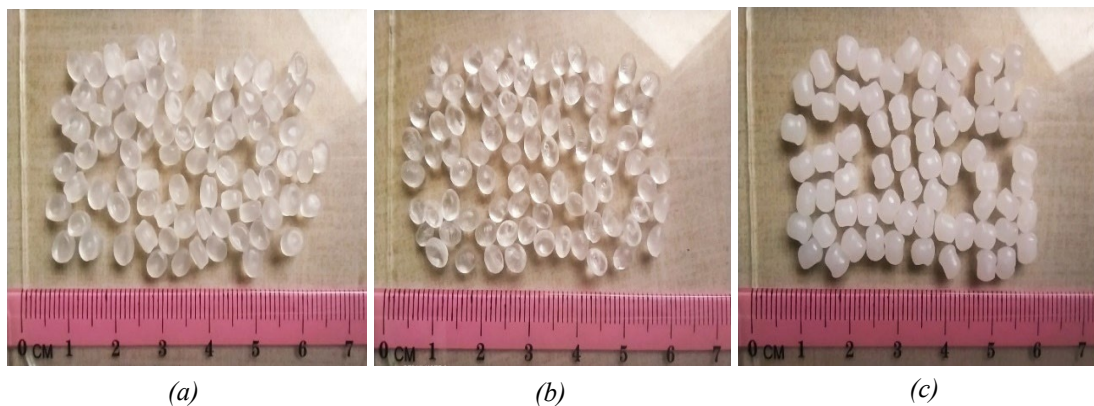
Ce chapitre détaille minutieusement les différentes installations utilisées, les équipements, les techniques expérimentales mises en œuvre ainsi que les méthodes de mesure utilisées dans le cadre de cette thèse. Il se compose de cinq parties : la première partie est consacrée aux matériaux polymères isolants étudiés dans cette thèse, où les matériaux étudiés comprennent trois types de particules : Polypropylène (PP), Polystyrène (PS) et Polyéthylène (PE). La deuxième partie présente les caractéristiques des matériaux polymères étudiés. La troisième partie décrit les installations et les procédures expérimentales. La quatrième partie est consacrée aux méthodes de mesure utilisées dans cette thèse. La cinquième partie traite de la question de la possibilité de la reproductibilité des mesures, c'est-à-dire la capacité à reproduire les résultats obtenus lors des expériences ou des observations.

Dans la plupart des expériences présentées dans cette thèse, une installation de base avec presque le même principe de fonctionnement a été employée, la seule différence réside dans le type et les dimensions des canalisations, où nous avons utilisé trois matériaux pour les canalisations, qui sont : le cuivre, acier galvanisé et chlorure de polyvinyle (PVC).

## II.1 Matériaux granulaires étudiés

Avant l'industrialisation des polymères, ou autrement dit à l'état brut des polymères, ils sont en général présents sous forme de granules, tel que : le polyamide (PA) est employé pour la fabrication de filtres, le polyéthylène (PE) est utilisé dans la confection de câbles, ou encore l'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS) est destiné à la production de boîtiers d'ordinateurs ainsi que de la majorité de leurs composants. À l'inverse, pendant la procédure de traitement des déchets contenant des matières plastiques, les polymères sont réduits en particules granulaires grâce à l'opération de broyage [134].

Au cours de cette étude, l'ensemble des expériences ont été réalisées en recourant à trois variétés de matériaux granulaires isolants, à savoir le Polypropylène (PP), le Polystyrène (PS) et le Polyéthylène (PE). Ces matériaux se caractérisent par être des matériaux isolants, et qui présentent des variations subtiles les unes par rapport aux autres en ce qui concerne leurs propriétés, leur forme et leurs dimensions. La **Figure II.1** illustre les différentes particules qui ont été utilisées tout au long de cette thèse.



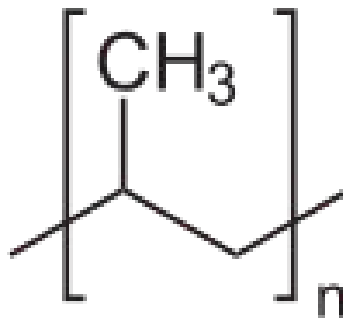
*Figure II.1 : Les particules isolantes employées lors des expériences : (a) Polypropylène (PP) ; (b) Polystyrène (PS) ; (c) Polyéthylène (PE).*

## II.2 Caractéristiques des matériaux étudiés

Les particules utilisées dans les expériences de cette thèse diffèrent en termes de propriétés physiques et chimiques, et chacune possède ses propres caractéristiques spécifiques. Dans nos expériences de cette thèse, nous avons employé des particules de PP, PS et PE mesurant environ 2,5 mm à 3 mm de taille. Les paragraphes **II.2.1**, **II.2.2** et **II.2.3** présentent les caractéristiques de chaque type de particule étudiée.

## II.2.1 Polypropylène (PP)

Le polypropylène, également connu sous l'acronyme PP, représente un polymère thermoplastique largement utilisé dans de nombreux domaines en raison de ses excellentes propriétés. Il est particulièrement reconnu pour sa résistance chimique, thermique et électrique, ainsi que pour sa haute rigidité diélectrique. Il est utilisé dans une grande variété de secteurs, notamment dans le domaine de l'emballage, de l'industrie automobile, de l'électroménager, du sanitaire et dans l'industrie textile pour créer des tissus de qualité, et il est indispensable pour de nombreuses autres applications. Sa production constitue une part qui dépasse les vingt pour cent de l'ensemble des plastiques fabriqués à l'échelle mondiale [135]. La **Figure II.2** montre la formule chimique du polypropylène PP :



*Figure II.2 : Formule chimique du PP [136].*

### II.2.1.1 Caractéristiques du polypropylène

Les principales caractéristiques et propriétés des particules de polypropylène (PP) sont présentées dans le **Tableau II.1**.

**Tableau II.1** : Principales caractéristiques du polypropylène [135, 137-140].

Permittivité relative $\epsilon_r$ à 50 Hz	2.2
Rigidité diélectrique $e_v$ (kV/mm)	300
Résistivité transversale $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$10^{15}$ à $10^{17}$
Masse volumique moyenne ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	905
Résistance de rupture diélectrique (kV/mm)	200
Température de fusion ( $^{\circ}\text{C}$ )	160-176
Température maximum d'utilisation $T_{\text{max}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	110
Vitesse de combustion	Lent
Dureté (Rockwell)	R85 – R110
Facteur de dissipation (à 60 Hz)	0,0005
Tension de surface ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )	28
Indice de fluidité (g/10min)	15
Taux de cristallinité (%)	50
Elasticité (%)	7

### II.2.1.2 Différentes utilisations du polypropylène

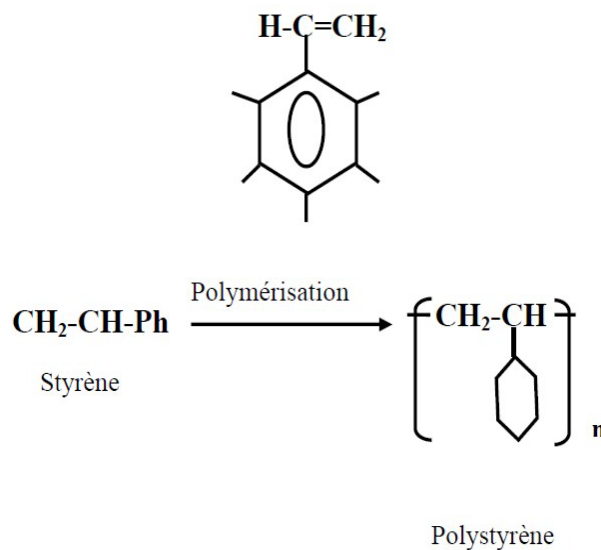
Le polypropylène est présent dans une multitude de produits. On le retrouve couramment dans les tapis et les fibres textiles, sous forme de films dans les emballages. De plus, il est également utilisé sous forme moulée dans divers produits tels que l'électroménager et les ustensiles ménagers comme la vaisselle pour four à micro-ondes, en outre, il est présent dans les jouets, les bagages et même les meubles de jardin. En plus d'être employé pour fabriquer les tissus d'ameublement, le polypropylène est également employé dans la production de tenues professionnelles à usage unique (comme les combinaisons de peinture, les charlottes, les masques chirurgicaux, etc.). Il est aussi utilisé pour la fabrication des sacs tissés résistants, des géotextiles et des géomembranes. De plus, on peut le retrouver sous forme de fibres utilisées dans la fabrication des cordages, les moquettes et même le gazon synthétique. On trouve des pailles à boire également confectionnées à partir de polypropylène [136]. Le **Tableau II.2** illustre les principaux secteurs d'utilisation des particules de polypropylène PP.

**Tableau II.2 : Principaux domaines d'application du polypropylène [136].**

Emballages	50 %	Electricité, électronique	6 %
Fibres	12 %	Transport	6 %
Biens de consommation	12 %	Construction	6 %

### II.2.2 Polystyrène (PS)

Le polystyrène (PS) est un polymère thermoplastique largement utilisé dans diverses applications. Il se décline en trois formes principales : tout d'abord, on retrouve le polystyrène cristal, également connu sous l'acronyme GPPS (General Purpose PolyStyrene en anglais), qui est un matériau simple. Ensuite, on peut le trouver sous forme d'un mélange avec du polybutadiène, ce qui donne une variante à haute résistance à l'impact, connue en général avec l'acronyme HIPS (High Impact PolyStyrene en anglais). Enfin, le polystyrène peut également se présenter sous forme de mousse de polystyrène, qui est largement employée dans l'isolation thermique et acoustique, ainsi que dans l'emballage. Ce polymère qui est optiquement transparent, abordable et facile à façonner est communément utilisé dans la fabrication des boîtiers de CD. Dans sa forme la plus élémentaire, le polystyrène est fragile. En ajoutant du polybutadiène au polystyrène, les propriétés mécaniques du polystyrène s'améliorent beaucoup, mais sa transparence optique diminue. Le PS à haute résistance à l'impact qui contient 10% de polybutadiène est plus robuste, même dans des conditions froides, jusqu'à -12 °C. La principale utilisation du polystyrène est pour réaliser de la mousse d'emballage [100]. La polymérisation en masse du styrène liquide à température ambiante est un processus chimique qui permet d'obtenir du polystyrène qui se distingue par des excellentes caractéristiques électriques [141].



*Figure II.3 : La polymérisation du styrène [141].*

### II.2.2.1 Caractéristiques du Polystyrène

Il s'agit d'un matériau solide à une température de 20°C, et devient pâteux à une température de 120°C, et dont le point de fusion se situe entre la température 150°C et 170°C. Il possède des caractéristiques inflammables et combustibles, avec une température d'auto-inflammation d'environ 490°C. Il se dissout aussi dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques [141]. Le **Tableau II.3** représente les principales propriétés des particules de polystyrène PS.

**Tableau II.3 : Principales caractéristiques physiques de PS [141, 142].**

Température de service [°C]	-40 à 75
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	1040 - 1050
Résistivité [Ω.m]	10 <sup>17</sup>
Rigidité diélectrique [kV/mm]	40 à 100
L'absorption d'eau [%]	0,05 à 0,6
Indice de réfraction	1,57–1,60
Température de transition vitreuse Tv (°C)	100

### II.2.2.2 Domaine d'application du polystyrène

Tout le monde conviendra probablement que l'utilisation du plastique dans la vie quotidienne est évidente à chaque instant. Même si nous ne connaissons pas le matériau spécifique en question, nous voyons les matériaux partout autour de nous. Le polystyrène est un matériau extrêmement polyvalent, ce qui le rend applicable dans divers domaines et industries. Voici les applications les plus populaires :

- **Emballage** : de par sa légèreté et sa durabilité, le PS est idéal pour l'emballage de produits alimentaires, électroniques et cosmétiques.
- **Construction** : comme isolation thermique et acoustique sous forme de mousse de polystyrène.
- **Fabrication de produits ménagers** : par exemple boîtiers pour appareils électroménagers.
- **Éléments décoratifs et publicitaires** : grâce à la facilité de transformation [143].

### II.2.3 Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels en raison de ses propriétés intéressantes. Le PE occupe une part prépondérante dans la consommation globale de polymères dans le monde, ce qui témoigne de son importance dans l'industrie. Le polyéthylène est un matériau qui se caractérise par son inertie, c'est-à-dire sa capacité à ne pas réagir chimiquement avec son environnement. Aussi la résistance du polyéthylène à l'eau douce et à l'eau salée, aux aliments et à la plupart des solutions aqueuses est extrêmement élevée. C'est pourquoi il est beaucoup utilisé pour les articles ménagers et les contenants alimentaires. Le polyéthylène est peu coûteux et facile à mouler et utiliser. Il peut être texturé ou métallisé, et son toucher est agréable, légèrement cireux. Son choix de couleurs est vaste, il peut être transparent, translucide ou opaque [68]. La **Figure II.4** représente la forme chimique et le schéma représentatif du polyéthylène PE.

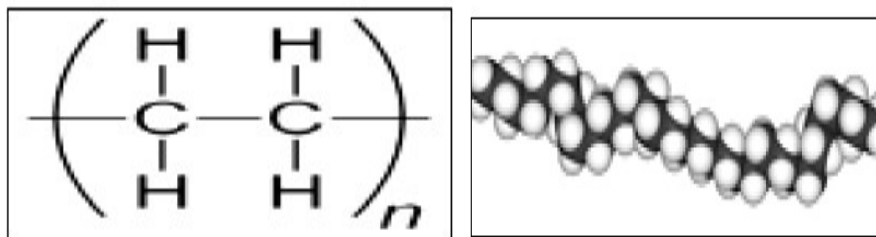


Figure II.4 : La forme chimique et le schéma représentatif du polyéthylène [144].

### II.2.3.1 Caractéristiques du Polyéthylène

Le **Tableau II.4** montre les propriétés principales des particules de polyéthylène (PE) utilisés lors des expériences de cette thèse.

**Tableau II.4** : Principales propriétés des granulaires de PE utilisés [135, 138].

Densité [g/cm <sup>3</sup> ]	0.93 – 0.97
Couleur	Blanche
Forme	quasi sphérique
Diamètre (mm)	2.5 à 3
Permittivité relative $\epsilon_r$ à 50 Hz	2.3
Rigidité diélectrique (kV/mm)	18
Résistivité transversale $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$10^{14}$ - $10^{18}$
masse volumique moyenne (kg·m <sup>-3</sup> )	946- 960
Résistance de rupture diélectrique (kV/mm)	200
Température de fusion (°C)	130
Température maximum d'utilisation Tmax (°C)	60
Tension de surface (mJ/m <sup>2</sup> )	31

### II.2.3.2 Domaines d'utilisation du polyéthylène

Le polyéthylène est utilisé dans de multiples secteurs. Il est essentiellement utilisé dans l'isolation, la préservation et la sécurité des câbles électriques. Il est également utilisé pour l'industrie des canalisations tel que : les conduites pour le transport de gaz naturel et d'eaux, entre autres. Aussi le polyéthylène peut être utilisé dans le secteur de l'alimentation comme :

l'emballage d'huile... etc. Il peut également être utilisé pour la fabrication des équipements de navire maritimes et automobiles [145].

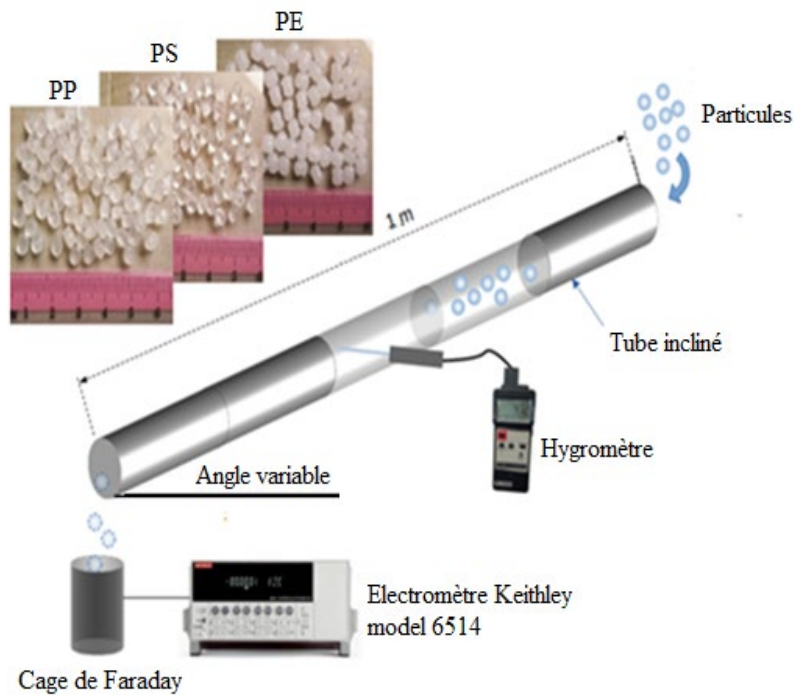
## II.3 Installations et procédures expérimentales

Cette section aborde les installations et les méthodes expérimentales employées dans toutes les études expérimentales de cette thèse. Deux dispositifs de charge ont été employés lors des expériences, à savoir le dispositif de chargement par effet triboélectrique et le dispositif de chargement par effet couronne.

### II.3.1 Dispositif de charge par effet triboélectrique

#### II.3.1.1 Description du dispositif de chargement par effet triboélectrique

Dans la **Figure II.5**, on peut observer le principal dispositif expérimental pour le chargement triboélectrique, ainsi que les différents matériaux polymères granulaires qui ont été utilisés lors des expériences. Les particules de polypropylène (PP), de polystyrène (PS) et de polyéthylène (PE) ont une forme quasi sphérique et mesurent entre 2,5 mm et 3 mm de diamètre. Chaque échantillon de granulés contient 30 g et est renouvelé à chaque nouvelle expérience. Le dispositif expérimental se compose principalement d'un tube incliné de 1 m de longueur. Nous avons utilisé trois types de tubes, un tube en métal galvanisé de 80 mm de diamètre, un tuyau en métal (cuivre) d'un diamètre de 40 mm et un tuyau de 40 mm de diamètre en plastique (PVC). Le tuyau incliné sert à éviter l'utilisation d'air en écoulement et à assurer un contact maximal entre les particules et la paroi du tuyau. L'ensemble de l'installation est soutenu par un support en bois incliné à des angles variables. Le tube était incliné d'un angle de  $21^\circ$  dans la plupart des expériences, tandis que dans d'autres expériences, nous avons modifié l'angle. Dans les expériences où nous avons utilisé plus d'un mètre de tuyau, la longueur d'installation souhaitée est obtenue en connectant des tubes d'un mètre jusqu'à atteindre la longueur finale.



*Figure II.5 : Schéma descriptif de l'installation expérimentale.*



*Figure II.6 : Photographie du dispositif de charge par effet triboélectrique utilisé lors des expériences.*

### II.3.1.2 Étapes expérimentales du dispositif de charge par effet triboélectrique

Les particules de 30 g, préchargées ou non, sont introduites en haut de l'installation pour dériver le long du tube sous l'effet de leur propre poids. À la sortie du tube, un électromètre

connecté à une cage de Faraday mesure la charge totale accumulée par l'échantillon de 30 g de particules. L'utilisation de la forme granulaire des particules permet d'étudier le comportement d'un groupe de particules plutôt qu'un simple contact entre deux matériaux, réduisant ainsi les variations entre expériences.

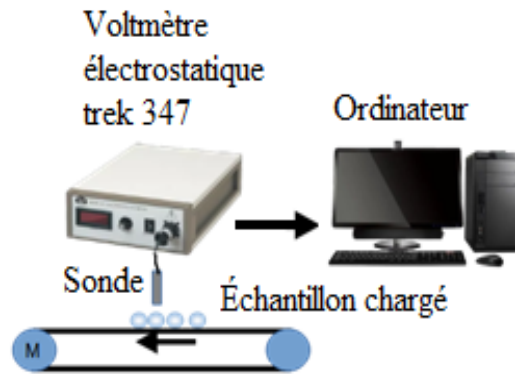
Lors des expériences de l'étude de l'impact de la température et de la longueur du tube, on a chauffé l'installation de l'intérieur à l'aide d'un ventilateur à air chaud jusqu'à atteindre la température cible. Les mesures de tribocharge sont réalisées pour trois niveaux de température : 20-22 °C (température ambiante), 35 °C et 45 °C. La température de la paroi du tuyau est évaluée avec précision en utilisant un thermomètre à double canal (interface informatique RS-232) modèle (TM-915A). La température et l'humidité à l'intérieur du tube ainsi qu'à l'intérieur du laboratoire sont mesurées à l'aide d'un hygromètre à sonde externe (Lutron AM-4205 A). Les expériences sont répétées au moins trois fois pour chaque température et chaque longueur. Dans cette étude, nous avons modifié la longueur des tuyaux d'un mètre à cinq mètres.

Dans les expériences où les particules ont été préchargées, les particules préchargées, avec une charge initiale  $Q_0$ , passent par les mêmes étapes précédentes, sauf que le même échantillon de granules est réintroduit plusieurs fois dans le tube, et la charge gagnée est mesurée après chaque passage, jusqu'à atteindre la saturation. Au cours de ces expériences, les mesures de tribocharge sont effectuées dans des conditions ambiantes à une température de 20°C avec une marge d'erreur de  $\pm 1^\circ\text{C}$  et une humidité relative de  $\text{HR} = 40\%$  avec une marge d'erreur de  $\pm 5\%$ .

Dans les expériences où nous avons étudié la charge de saturation, au cours de chaque expérience, le même échantillon de particules a été passé à plusieurs reprises dans le tube jusqu'à ce que la saturation soit atteinte. Chaque passage de l'échantillon de 30 g dans le tube prend un temps moyen mesuré  $T = 1,6$  s. Au cours de ces expérimentations, les mesures de tribocharge sont effectuées dans des conditions atmosphériques ambiantes en laboratoire.

Lors des expériences visant à étudier l'influence de la masse des granules, la quantité de masse des granules variait de 5 g à 60 g. Les échantillons ont été renouvelés à chaque expérience et à chaque masse sans aucune charge initiale. Dans chaque expérience de chaque masse, le même échantillon de particules a été passé plusieurs fois dans le tube jusqu'à ce que la saturation soit atteinte. On a effectué un profil de répartition du potentiel de surface sur plusieurs échantillons afin d'approfondir notre compréhension de ce phénomène. Un voltmètre électrostatique (Trek 347) a été utilisé pour mesurer la répartition du potentiel à la surface du

matériaux granulaires. Pour cela, les particules chargées ont été étalées en monocouche sur une plaque métallique mobile reliée à la terre et scannées le long du centre de l'échantillon (**Figure II.7**).



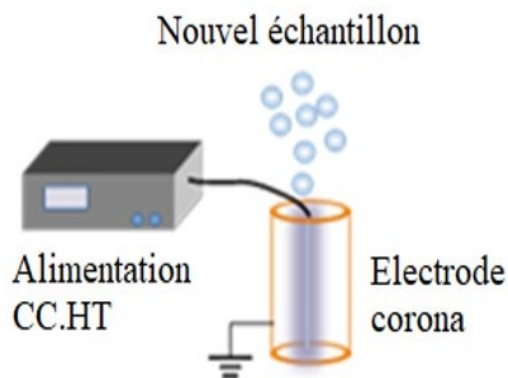
*Figure II.7 : Méthode de mesure du potentiel de surface.*

## II.3.2 Dispositif de charge par effet couronne

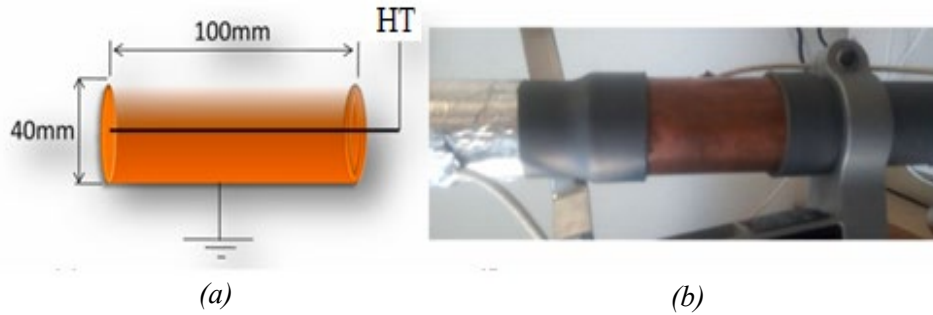
### II.3.2.1 Description du dispositif de chargement par effet couronne

Le schéma descriptif du processus de chargement par décharge couronne est représentée dans la **Figure II.8**. La méthode de charge par décharge corona a été employée dans les expériences dans lesquelles nous avons étudié l'effet de la charge initiale obtenue par une décharge corona DC.

L'électrode corona est constituée d'un cylindre en cuivre coaxial avec un fil interne d'un diamètre de 0,2 mm, représentée en détail dans la **Figure II.9** et décrit dans la référence [146].



*Figure II.8 : Schéma descriptif de la méthode de charge par décharge corona.*



*Figure II.9 : Dimensions de l'électrode cylindrique coaxiale en cuivre : (a) Dimensions de l'électrode corona coaxiale ; et (b) Photographie de l'électrode coaxiale [146].*

### II.3.2.2 Étapes expérimentales du dispositif de charge par effet couronne

L'échantillon de particules non chargées pesant 30 g acquiert une charge par décharge corona lorsqu'elles traversent l'électrode cylindrique coaxiale en cuivre, et le fil existant au centre du cylindre est alimenté par une source HT, le champ électrique radial crée la décharge corona à proximité du fil [146], ce qui amène les particules à acquérir une charge lorsqu'elles traversent l'électrode cylindrique coaxiale en cuivre.

## II.4 Méthodes de mesures

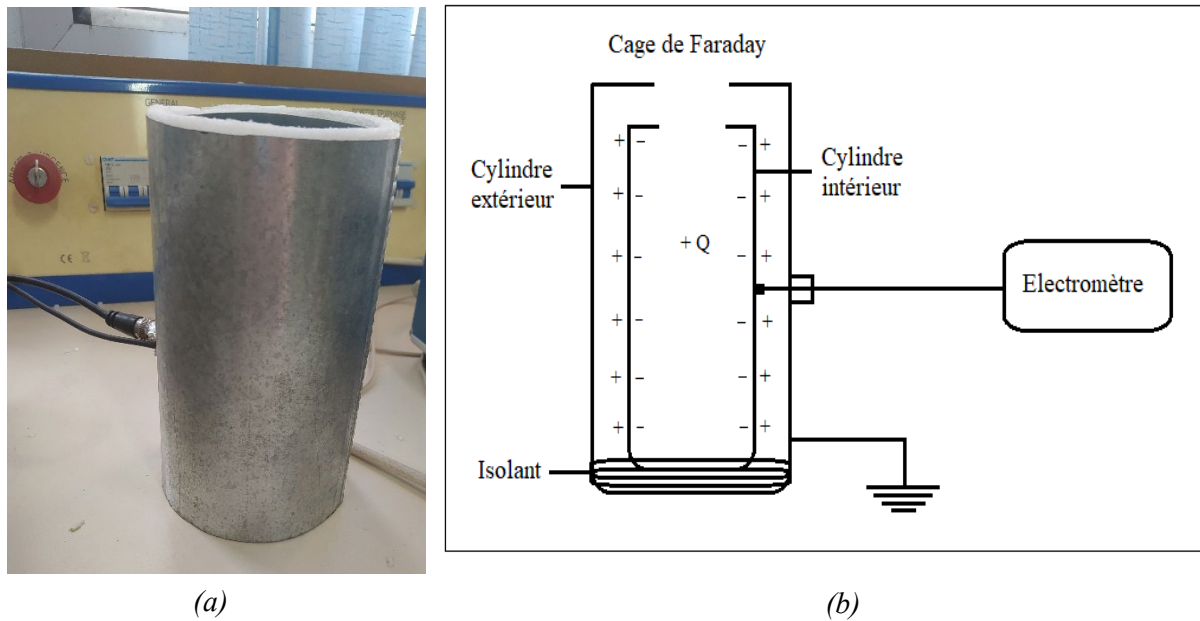
La mesure des grandeurs électrostatiques revêt une grande importance lorsqu'il s'agit de caractériser les matériaux diélectriques et de saisir les phénomènes qui en découlent [147].

Pour obtenir des résultats précis lors d'expériences en laboratoire et la possibilité de les reproduire par d'autres chercheurs, il est nécessaire de prendre en compte la mesure de tous les paramètres susceptibles d'influencer les résultats. La quantification de ces paramètres permet d'améliorer les résultats et de faciliter la compréhension. Les mesures les plus cruciales impliquent la quantification de la masse granulaire des échantillons avant le commencement de chaque expérience, ainsi que la mesure de la charge au début et à la fin de chaque expérience. De plus, il est primordial de surveiller en continu l'humidité relative et la température ambiante en laboratoire tout au long du processus expérimental, entre autres.

### II.4.1 Mesure de la charge à l'aide d'une cage de Faraday

Il est essentiel de posséder de méthodes pour caractériser et/ou mesurer à la fois la polarité et la quantité des charges électrostatiques présentes au sein des particules [32]. La cage de Faraday est le dispositif le plus répandu et le plus couramment employé pour mesurer ces charges [67]. Les cages de Faraday tirent leur appellation du scientifique anglais Michael Faraday, où en 1836 que ce dernier a inventées ces cages, qui portent aujourd'hui son nom en hommage à ses travaux dans ce domaine [32].

Une cage de Faraday est une enceinte réalisée en matériaux conducteurs, typiquement utilisée pour protéger un appareil électrique des nuisances électromagnétiques extérieures ou inversement de l'empêcher à polluer son environnement. La cage de Faraday, quand elle est utilisée pour quantifier la charge électrique, est communément composée de deux cylindres concentriques qui sont séparés par un matériau isolant. Le cylindre externe est mis à la terre afin de minimiser les perturbations électriques externes, tandis que le deuxième cylindre est raccordé à un électromètre pour quantifier les charges électriques des objets placés à l'intérieur de la cage [148]. Le fonctionnement de la cage de Faraday repose sur le principe selon lequel qu'un champ électrique statique extérieur provoquera une redistribution des charges électriques dans le matériel conducteur de la cage pour éliminer l'effet du champ à l'intérieur de la cage [32]. Étant donné que la décroissance de la charge des particules change au fil du temps, l'utilisation de cette technique de mesure de la charge nous a offert la possibilité d'obtenir des valeurs immédiates et exactes [50]. La **Figure II.10** illustre la cage de Faraday qui est utilisée dans l'ensemble des expérimentations de cette thèse.



**Figure II.10 :** La cage de Faraday : (a) Une image montrant la cage de Faraday employée dans l'ensemble des expériences ; et (b) Schéma explicatif du mécanisme de fonctionnement de la cage de Faraday.

L'électromètre numérique de marque Keithley, modèle 6514 (**Figure II.11**), était l'instrument de mesure de la charge électrique constamment exploité durant les expériences.



**Figure II.11 :** Electromètre numérique de la marque Keithley modèle 6514 [149].

Les caractéristiques principales de l'électromètre numérique de la marque Keithley (modèle 6514) sont exposées dans le **Tableau II.5**.

**Tableau II.5** : Caractéristiques de l'électromètre numérique de marque Keithley, modèle 6514 [149].

Bruit	<1fA
Impédance d'entrée	>200TΩ pour les mesures de tension
Mesure de charge	De 10fC à 20μC
Vitesse de lecture	Vitesse élevée - jusqu'à 1200 lectures/seconde
Interfaces faciles avec les commutateurs, les ordinateurs et les manipulateurs de composants	
Annule facilement les décalages de tension et de courant	

### II.4.2 Mesure de la masse granulaire

L'une des études réalisées dans le cadre de cette thèse concerne l'influence de la masse granulaire sur le tribochargement des particules, étant donné que la masse granulaire a un impact sur le processus de chargement des granules. Ainsi, la masse granulaire est mesurée préalablement à chaque expérience à l'aide d'une balance électronique numérique de haute précision de la marque Ming Heng (modèle MH-999). Les principales caractéristiques de cette Balance électronique sont indiquées en détail dans le **Tableau II.6**.

**Tableau II.6** : Principales caractéristiques de la Balance électronique numérique "Ming Heng" Modèle MH-999.

Calibrage	Étalonnage automatique
Plage de tare	Tarer la pleine capacité
Température de fonctionnement	10 ~ 30°C
Capacité	600g×0,01g
Taille totale (dimensions)	165×110×21 mm

### II.4.3 Mesure de la température et de l'humidité relative (conditions atmosphériques)

Il est indispensable de mesurer avec précision l'humidité relative ainsi que la température à l'intérieur du laboratoire lors de chaque série d'expériences menées, parce que les conditions atmosphériques à l'intérieur du laboratoire sont considérées comme l'un des facteurs majeurs influençant les résultats des expériences, notamment en ce qui concerne les résultats du

phénomène de tribocharge. À cette fin, on a utilisé au cours des expériences un Thermo Hygromètre numérique de la marque Lutron (modèle AM-4205 A) (**Figure II.12**).



*Figure II.12 : Thermo Hygromètre / Anémomètre numérique Lutron (modèle AM-4205 A) [150].*

Le **Tableau II.7** illustre les principales propriétés du Thermo Hygromètre numérique Lutron utilisé pendant l'ensemble des expérimentations de cette thèse.

**Tableau II.7** : Caractéristiques principales du Thermo Hygromètre numérique Lutron (modèle AM-4205 A) [32, 150].

Anémomètre, Humidité/Température et thermomètre de type K/J
Le circuit du microprocesseur assure une précision maximale possible
Affichage du compteur à double fonction
Mesure de température intégrée °C °F
Capteur de thermistance pour mesure de température, temps de réponse rapide
Capteur de capacité à couche mince pour la mesure de l'humidité
Enregistre les lectures maximales et minimales avec rappel
Maintien des données
Coupure automatique de l'alimentation
Sonde allongée qui permet d'effectuer des mesures à des endroits difficiles d'accès

#### II.4.4 Mesure de la température de surface de l'installation

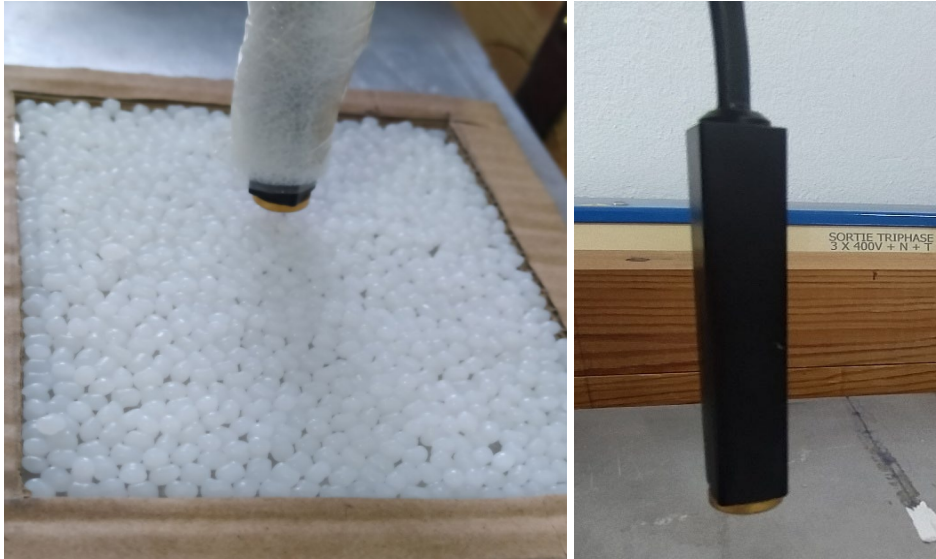
Pendant le processus de triboélectricité des particules, la charge des particules est influencée par la température de surface du tuyau. Donc, on a quantifié en permanence la température du tube au cours de chaque expérience, surtout au cours des expériences que nous avons réalisées afin d'étudier l'impact de la longueur et de la température du tube sur la triboélectricité des particules. La température du tube a été mesurée à l'aide d'un Thermomètre à deux canaux (interface informatique RS-232) modèle (TM-915A) (**Figure II.13**).



*Figure II.13 : Thermomètre à deux canaux (interface informatique RS-232) modèle (TM-915A).*

#### II.4.5 Mesure de potentiel de surface à l'aide d'un voltmètre électrostatique

La mesure du potentiel de surface des particules isolantes est effectuée après leur chargement (par effet triboélectrique ou par effet couronne), c'est via les avoir étalées en monocouche sur une plaque métallique mobile reliée à la terre et scannées le long du centre de l'échantillon à l'aide d'une sonde électrostatique (**Figure II.14**) reliée à un voltmètre électrostatique numérique de la marque Trek, modèle 347 (**Figure II.15**).



*Figure II.14 : Sonde électrostatique utilisée lors des expérimentations.*

Dans l'ensemble des expériences menées et qui concerne la mesure de potentiel de surface, la distance séparant la sonde électrostatique de la surface libre d'échantillons de particules était fixée à une valeur précise, et qui est  $h = 3 \text{ mm}$ .



*Figure II.15 : Voltmètre électrostatique numérique de la marque Trek (modèle 347) [151].*

Les caractéristiques du voltmètre électrostatique numérique Trek (modèle 347), utilisé dans toutes les expériences, sont présentées dans le **Tableau II.8**.

**Tableau II.8 : Principales caractéristiques du voltmètre électrostatique numérique Trek (modèle 347) [151].**

Chaîne de mesure	0 au C.C de $\pm 3$ kilovolts ou au C.A. de crête
Exactitude de mesure	Meilleur que 0,05% de complet (moniteur)
Vitesse de réponse	Moins Mme de 3 pour une étape de 1 kilovolt (10% 90%)
Mesure des potentiels électrostatiques	Sur le film, les polymères, et le papier
Affichage à LED de Facile-à-lecture	
Bien adapté pour les systèmes automatisés ou commandés par ordinateur	
Digital permettent permet à un périphérique externe de tourner l'alimentation d'énergie de HT interne "Marche/Arrêt"	
Mesures extérieures de tension des photoconducteurs ou des surfaces diélectriques	
Le moniteur fournit une reproduction de basse tension du potentiel électrostatique mesuré pour surveiller des buts ou pour l'usage comme signal de retour dans un système à boucle fermée	
Surveillance de charge dans la production de semi-conducteur	

## II.5 Reproductibilité des mesures

Pour évaluer la reproductibilité des mesures, chaque expérience a été répétée trois fois. Les résultats étaient très cohérents et l'écart type était faible. Nous avons essayé autant que possible de mener les mêmes expériences ou autrement dit les expériences de même type, dans les mêmes conditions atmosphériques, afin de limiter la variabilité des résultats et que les résultats ne soient différents. Nous avons maintenu les mêmes conditions dans chaque série d'expériences, ce qui a conduit à des résultats bons et reproductibles.

## Conclusions

Ce chapitre a pour objectif de décrire en détail les installations, les équipements, les dispositifs et les instruments employés dans toutes les études et les recherches présentées dans cette thèse, tout en identifiant les diverses particules isolantes utilisées pendant les expérimentations. Nous avons également discuté les méthodes de mesure des grandeurs électrostatiques. A l'issue du chapitre, nous pouvons souligner les éléments suivants :

- L'installation que nous avons adoptée dans presque toutes les expériences, qui contient essentiellement un tube incliné, afin d'éviter l'utilisation d'air en écoulement et d'assurer un contact maximal entre les particules et la paroi du tuyau.

- Dans toutes les expériences, nous avons adopté un poids de 30 g pour chaque échantillon.
- Toutes les particules utilisées sont de forme quasi sphérique avec un diamètre d'environ 2,5 mm à 3 mm.
- La mesure de grandeurs électrostatiques a permis de reproduire les mêmes mesures à d'autres moments.

## **CHAPITRE III**

# **Impact de la Longueur et de la Temperature de Tuyau Galvanisé Sur la Tribocharge et Prediction de la Charge Triboélectrique des Particules en Mouvement à L'intérieur du Tuyau Galvanisé**

# Chapitre III

## **Impact de la Longueur et de la Température de Tuyau Galvanisé Sur la Tribocharge et Prédiction de la Charge Triboélectrique des Particules en Mouvement à L'intérieur du Tuyau Galvanisé**

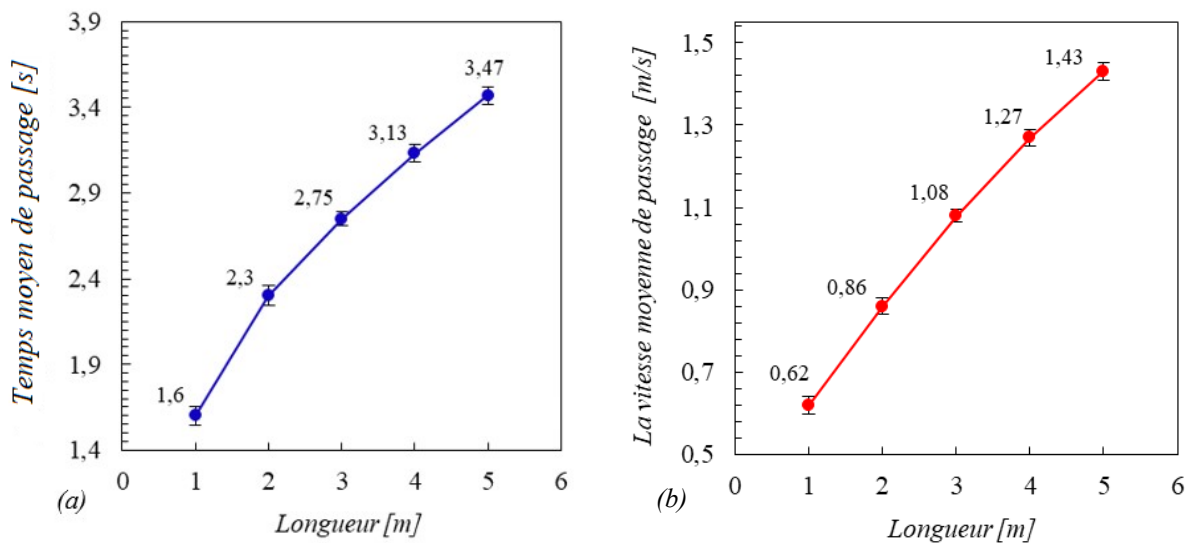
Les convoyeurs de matériaux à base de canalisation métallique couvrent une large gamme d'installations industrielles. Par exemple, les industries pharmaceutiques, chimiques, alimentaires et bien d'autres utilisent fréquemment le transport pneumatique de substances en poudre dans leurs processus de production, dans lesquels la formation d'une charge statique élevée est souvent observée [152, 153]. En effet, le chargement de particules par triboélectricité se produit dans presque tous les systèmes impliquant des particules en mouvement : transport pneumatique, lit fluidisé, mélange de poudres sèches, etc. [1, 84]. Les charges triboélectriques, qui peuvent être des électrons, des ions ou des matériaux chargés, sont échangées entre les matériaux lors du contact [154-156], cela entraîne la génération de charges superficielles sur les deux matériaux.

Il est très important de prédire la quantité de tribocharge engendrée pour l'ajustement et le réglage du système, comme les neutraliseurs de charge qui dépendent de la décharge corona.

Ce chapitre se concentre sur la prédiction de la tribocharge de particules polymères isolants en mouvement dans un tube galvanisé incliné. Nous avons porté une attention particulière à l'analyse de l'influence de la température et de la longueur du tube galvanisé et des conditions environnementales sur la charge triboélectrique des granules.

### III.1 Temps et vitesse de passage des particules dans le tube galvanisé

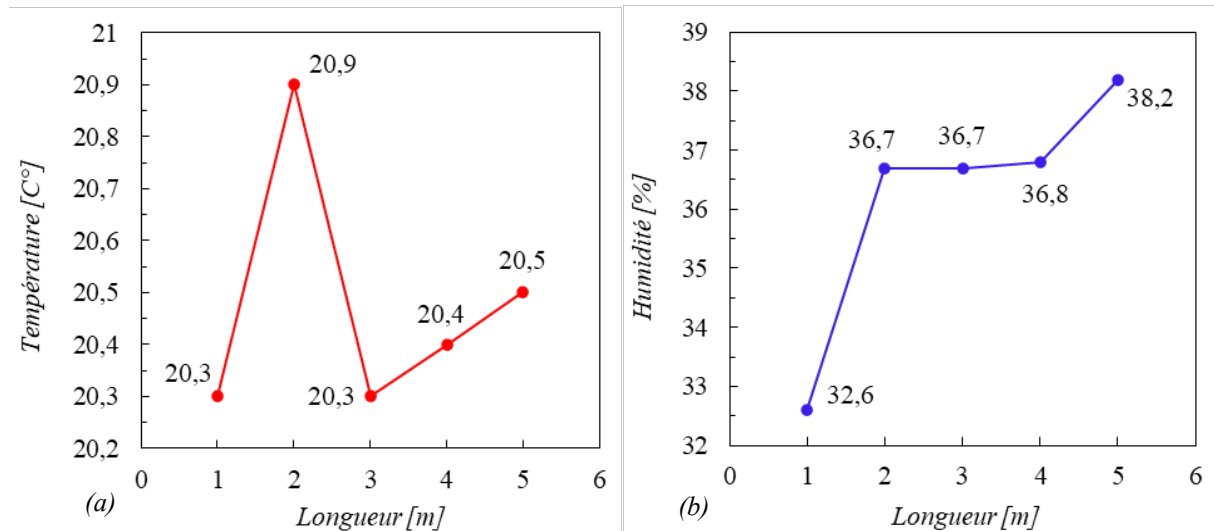
La **Figure III.1 (a)** représente la durée de passage des particules à l'intérieur de 1 m à 5 m de tube galvanisé. Où l'on remarque que le temps de transit des particules à travers le tuyau augmente avec l'accroissement de la longueur du tube galvanisé. La **Figure III.1 (b)** illustre la vitesse de passage des particules à l'intérieur de 1 m à 5 m de tuyau galvanisé. Où il apparaît que à mesure que la longueur du tube galvanisé est plus longue, les particules traversent le tuyau plus rapidement.



*Figure III.1 : (a) Temps de passage des particules à l'intérieur du tube ; (b) La vitesse à laquelle les particules traversent le tube.*

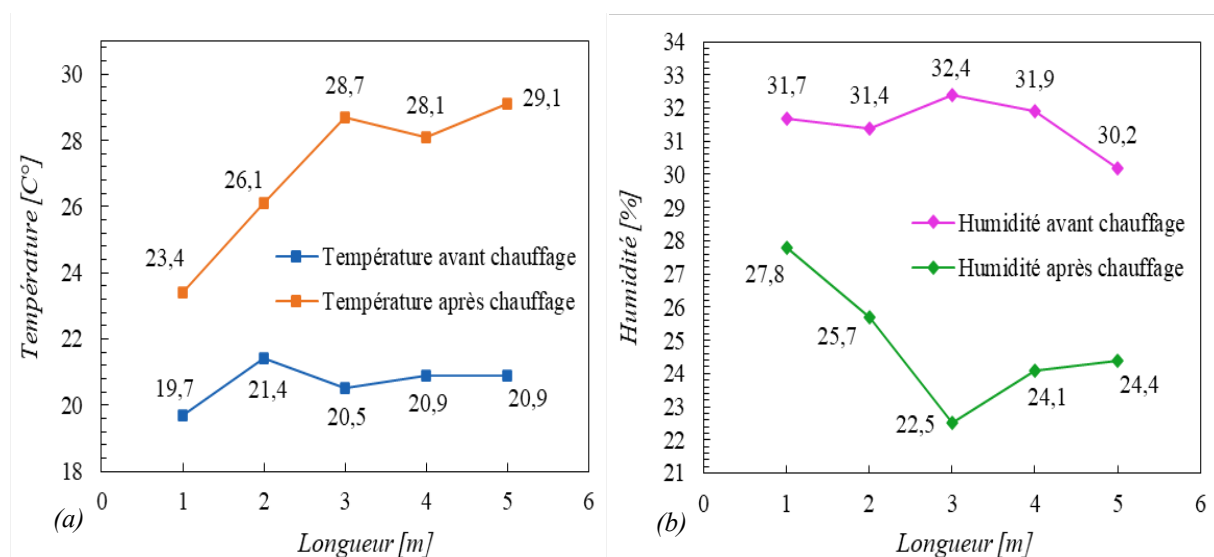
### III.2 Humidité et température à l'intérieur de tube galvanisé avant et après chauffage

La **Figure III.2** représente les valeurs de l'humidité relative et de la température à l'intérieur du tube galvanisé, pour des longueurs de tuyau allant de 1 m à 5 m, à une température ambiante de tube = 20 °C. Ces valeurs ont été mesurées et enregistrées lors des expérimentations.



**Figure III.2 :** (a) La température à l'intérieur du tube galvanisé de 1 m à 5 m à une température ambiante de tube = 20 °C ; (b) L'humidité à l'intérieur du tube galvanisé de 1 m à 5 m à une température ambiante de tube = 20 °C.

La **Figure III.3** et la **Figure III.4** représentent les valeurs de l'humidité relative et de la température à l'intérieur du tube galvanisé avant et après son chauffage, pour des longueurs de tuyau galvanisé variant de 1 m jusqu'à 5 m, alors que les températures du tube galvanisé = 35 °C et 45 °C, respectivement. D'après les résultats présentés dans la **Figure III.3** et la **Figure III.4**, nous constatons que l'humidité relative à l'intérieur du tuyau galvanisé diminue après chauffage du tuyau. Ainsi la diminution de l'humidité relative à l'intérieur du tube est inversement proportionnelle à l'augmentation de la température à l'intérieur du tuyau, peu importe la longueur du tube.



**Figure III.3 :** Les valeurs de la température et de l'humidité à l'intérieur du tube galvanisé avant et après chauffage du tube de 1 m à 5 m à une température de tube = 35 °C.

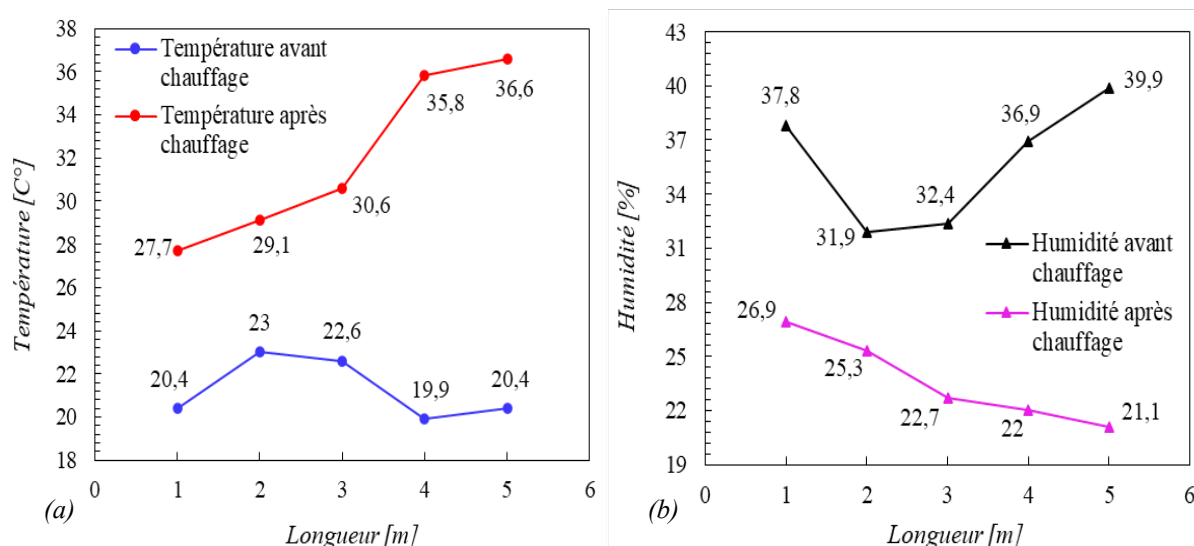


Figure III.4 : Les valeurs de la température et de l'humidité à l'intérieur du tube galvanisé avant et après chauffage du tube de 1 m à 5 m à une température de tube = 45 °C.

### III.3 Influence de la longueur du tube (Galvanisé/PVC) sur la tribocharge de particules (PE/PP)

#### III.3.1 Effet de la longueur du tube galvanisé sur la charge de granules de Polyéthylène

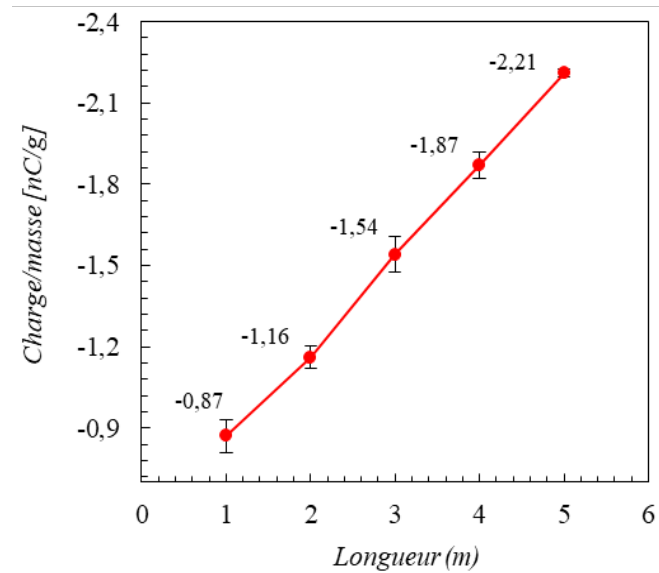
Le **Tableau III.1** montre les résultats de la mesure de la charge d'un échantillon de particules de PE non chargées (vierges) pesant 25,5 g.

**Tableau III.1** : Charge de particules de polyéthylène (PE) vierges.

Numéro d'essai	Charge [nC]	Masse [g]	Rapport [nC/g]	Moyenne [nC/g]	Écart Type du rapport
Échantillon 1	- 4,27	25,5	- 0,17	- 0,19	0,030784522
Échantillon 2	- 4,40	25,5	- 0,17		
Échantillon 3	- 5,69	25,5	- 0,22		

La **Figure III.5** illustre l'influence de la longueur du tuyau galvanisé sur la charge triboélectrique de granules de polyéthylène (PE) qui ont un poids de 30 g par échantillon, qui est renouvelé à chaque essai. Les particules de PE sont chargées négativement après passage dans le tube métallique galvanisé. Les résultats présentés dans la **Figure III.5** indiquent une corrélation positive entre l'augmentation de la longueur du tuyau galvanisé et l'augmentation de

la charge de particules de PE. L'accroissement de la longueur du tuyau conduit à une augmentation de la durée pendant laquelle les particules entrent en contact avec la paroi interne du tube à cause de l'allongement du temps de leur séjour à l'intérieur du tube, accroissant ainsi la charge des particules de PE.



*Figure III.5 : L'impact de la longueur du tuyau galvanisé sur le processus de tribocharge des granules de polyéthylène.*

### III.3.2 Effet de la longueur du tube PVC sur la charge de granules de Polypropylène

L'impact de la longueur du tube en PVC sur la triboélectricité des particules de polypropylène est démontré dans la **Figure III.6**. Les granules de PP sont chargées positivement après avoir traversé à l'intérieur du tuyau PVC. Les résultats exposés sur la **Figure III.6** indiquent que la charge de particules de polypropylène s'accroît quasi-proportionnellement en fonction de l'accroissement de la longueur du tuyau en PVC. Cette augmentation de la charge de particules de PP lorsque la longueur du tuyau en PVC augmente est due à la même raison mentionnée dans le paragraphe précédent.

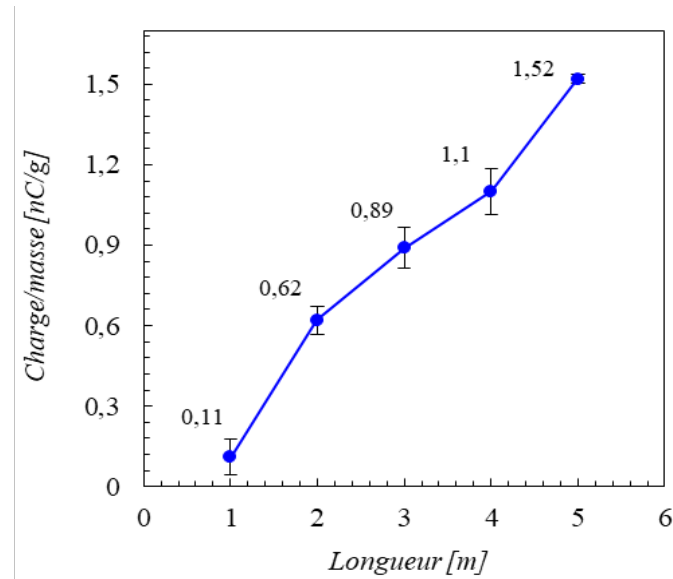


Figure III.6 : L'impact de la longueur du tuyau en PVC sur le processus de tribochargement des particules de polypropylène PP [RH = 30,6 % et T = 21,4 °C].

### III.4 Influence de la longueur et de la température du tube métallique galvanisé sur la tribocharge des particules récupérées de Polypropylène (PP)

Les résultats exposés dans le **Tableau III.2** représentent les mesures de la charge d'un échantillon de 30 g de granules de polypropylène non chargé, également appelées vierges.

Tableau III.2 : Charge de granules de polypropylène (PP) vierges.

Numéro d'essai	Charge [nC]	Masse [g]	Rapport [nC/g]	Moyenne [nC/g]	Écart Type du rapport
Échantillon 1	- 3,35	30	- 0,11	- 0,12	0,044347116
Échantillon 2	- 2,23	30	- 0,07		
Échantillon 3	- 5,22	30	- 0,17		
Échantillon 4	- 4,62	30	- 0,15		

La **Figure III.7** illustre l'impact de la longueur du tuyau galvanisé à différentes températures (20°C, 35°C et 45°C) sur la tribocharge de particules de PP récupérées. Les particules de polypropylène sont chargées négativement après avoir traversé le tube métallique galvanisé, ce qui indique un possible transfert d'électrons du métal vers le polymère diélectrique. Les résultats obtenus montrent un accroissement manifeste de la charge

triboélectrique des particules en fonction de l'accroissement de la longueur du tuyau galvanisé. En réalité, le fait d'augmenter la longueur du tuyau métallique galvanisé aura pour conséquence d'allonger la durée du contact entre les particules et la paroi interne du tube, car celles-ci passeront plus de temps à l'intérieur du tuyau. Cependant, les courbes obtenues montrent une quasi-saturation, plus apparente à 20°C. Quant à la température, elle a un effet réducteur sur le phénomène de chargement triboélectrique. À mesure que la température du tube s'accroît, la charge acquise par les particules devient moins importante. Dans la littérature consultée, les résultats rapportés sur l'influence de la température montrent des tendances parfois similaires et parfois différentes. Dans des configurations similaires, Greason [124] a étudié la tribocharge d'une sphère métallique dans un cylindre diélectrique et a rapporté que la triboélectricité diminue à mesure que la température augmente, ce qui est similaire aux résultats obtenus. Greason a expliqué que cela était dû à une diminution de la résistance de surface effective, ce qui a entraîné un accroissement des fuites de charge. Jantač et al ont rapporté le résultat inverse [157]. Dans leur étude de la triboélectricité de petites particules de PE (0,5 à 0,8 mm) en contact avec une boîte en aluminium, il a été constaté que la température avait un effet amplificateur sur la tribocharge. Selon les auteurs, ce résultat pourrait être une conséquence de la douceur du matériau à des températures supérieures, favorisant ainsi une augmentation de la surface de contact et, par conséquent, de la quantité de charge. Dans notre cas, en plus de l'explication donnée précédemment, deux raisons supplémentaires pourraient être considérées : la diminution de l'humidité, qui est un facteur essentiel au transfert de charge lors du contact [158], et d'autre part le détachement de matière lors du contact. En effet, il est possible que la douceur des particules conduise au détachement de fragments de matière chargés au contact du cylindre chauffé. Par conséquent, l'élévation de la température entraîne une légère altération de la surface des particules, ce qui a pour effet de modifier à la fois la forme et la quantité des charges.

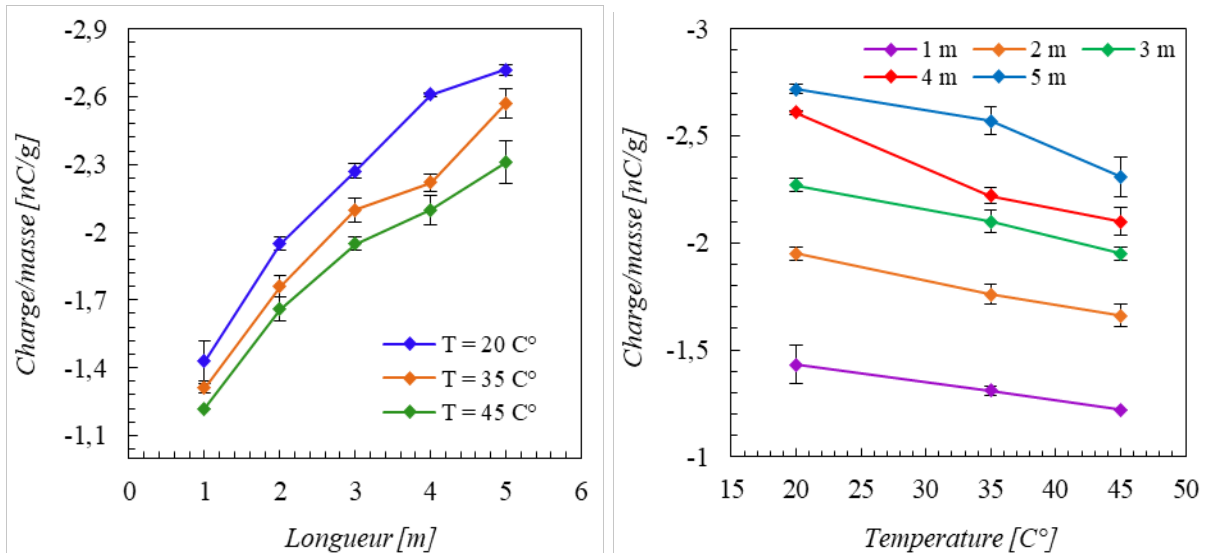


Figure III.7 : L'impact de la longueur et de la température du tube métallique galvanisé sur la charge triboélectrique des particules de polypropylène [RH = 32-38,5 % et T = 20,4-20,9 °C].

### III.4.1 Profil du potentiel de surface

#### III.4.1.1 Profil d'un échantillon de particules de polypropylène vierges (non chargées)

Le profil du potentiel de surface d'un échantillon contenant 30 g de particules de polypropylène non chargées est illustré dans la **Figure III.8**. Effectivement, les résultats présentés dans la **Figure III.8** indiquent une faible distribution de charges sur la surface des particules de l'échantillon de polypropylène. Cela s'explique par le fait que les particules de l'échantillon ne possèdent pas de charge (vierges).

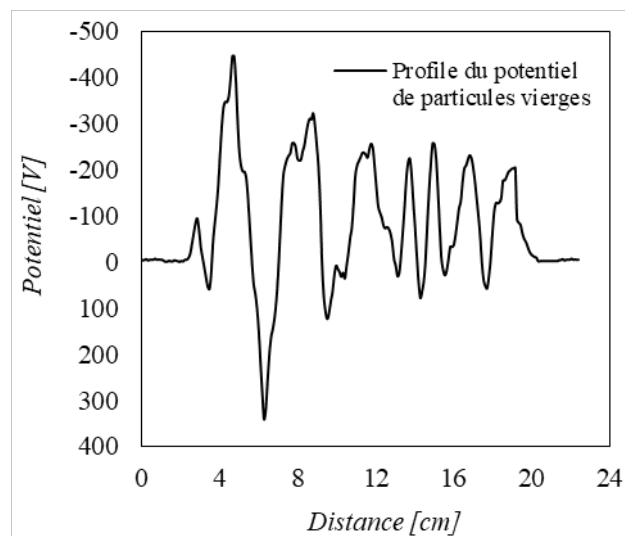


Figure III.8 : Le profil du potentiel de surface d'un échantillon de 30 g de granules de PP non chargés.

### III.4.1.2 Profil de l'effet de la longueur et de la température du tuyau galvanisé sur la tribocharge des particules de Polypropylène

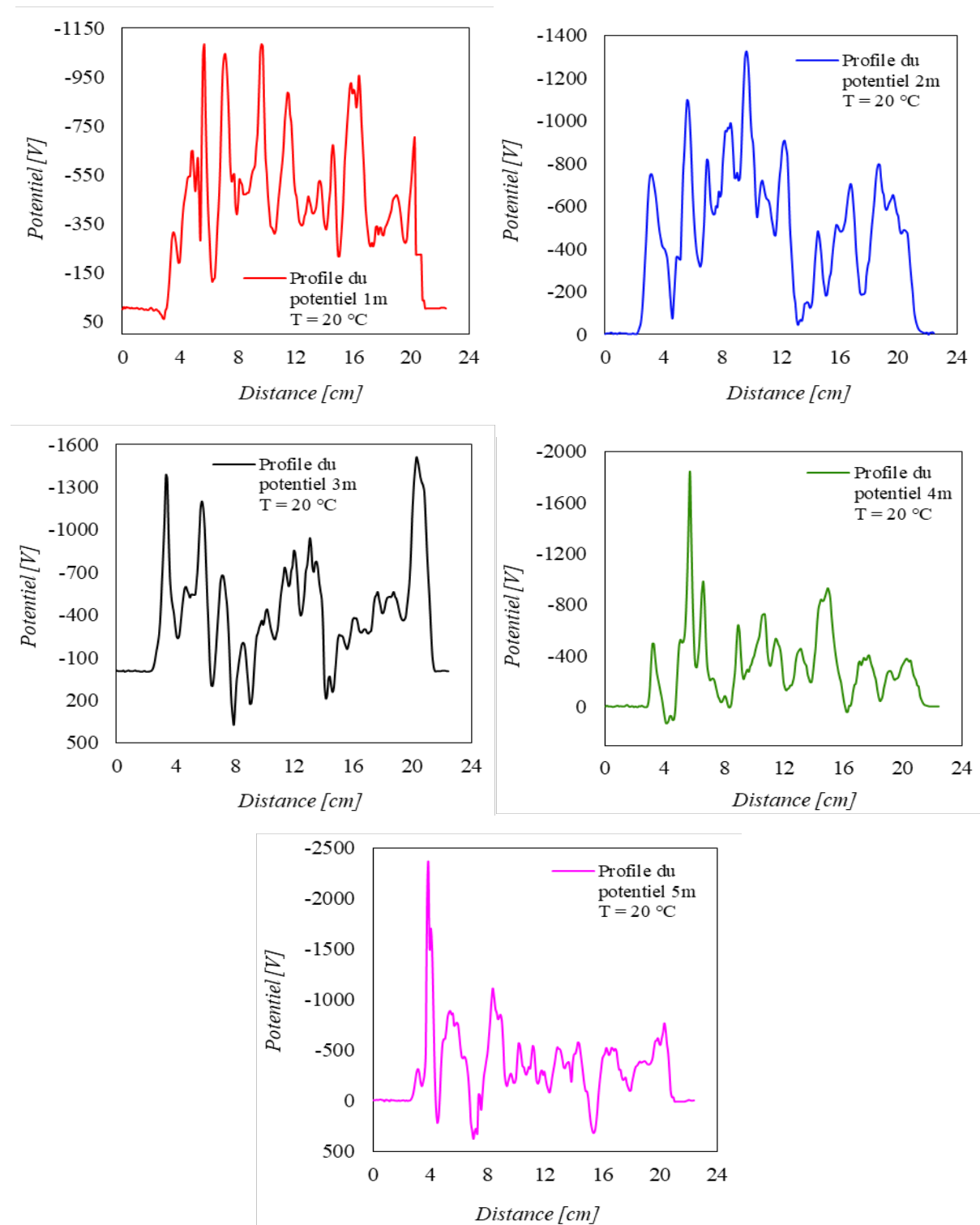


Figure III.9 : Profil du potentiel de surface d'un 30 g de particules de polypropylène de 1 m à 5 m, pour une température de tuyau galvanisé = 20°C.

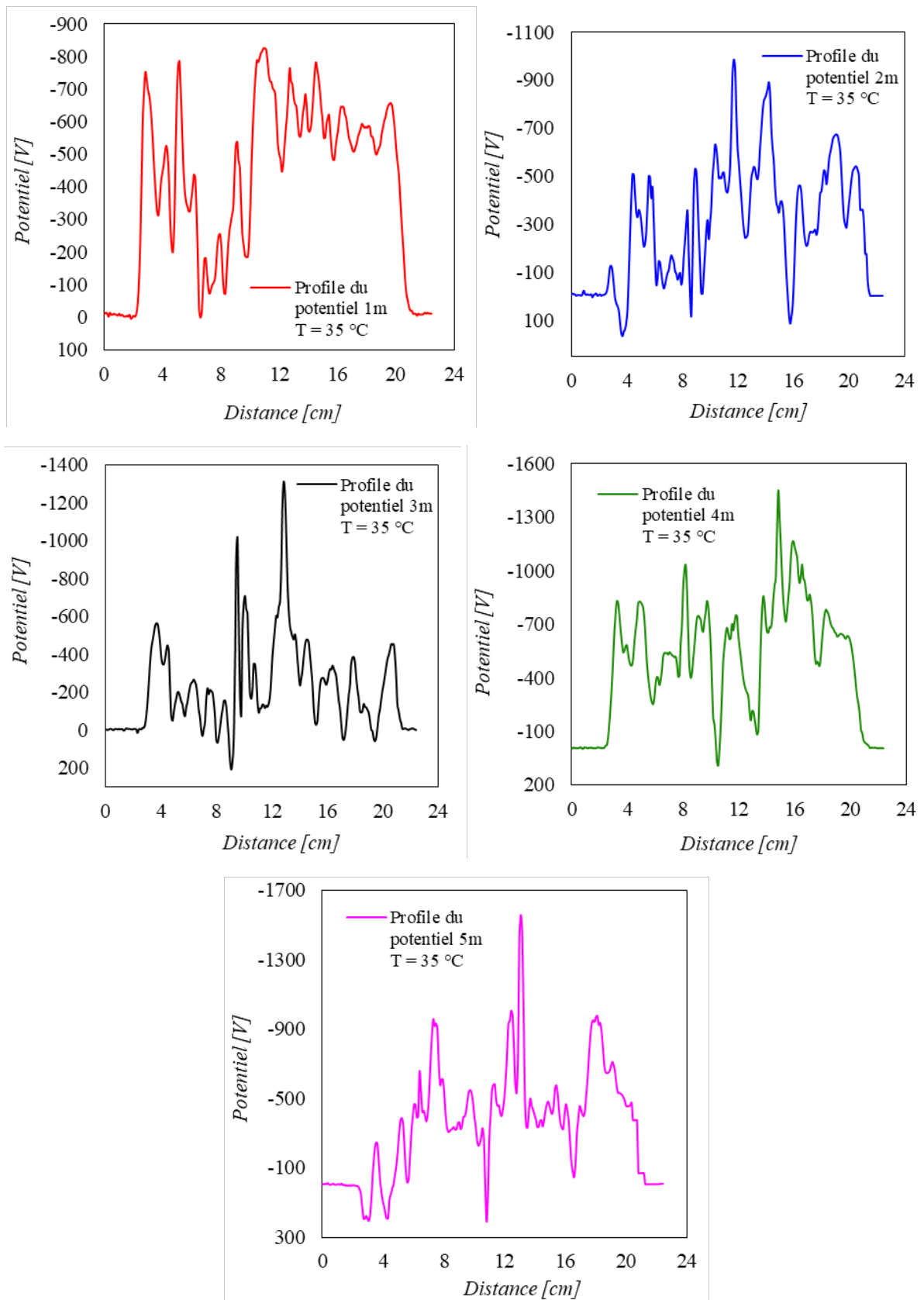


Figure III.10 : Profil du potentiel de surface d'un 30 g de particules de polypropylène de 1 m à 5 m, pour une température de tuyau galvanisé = 35°C.

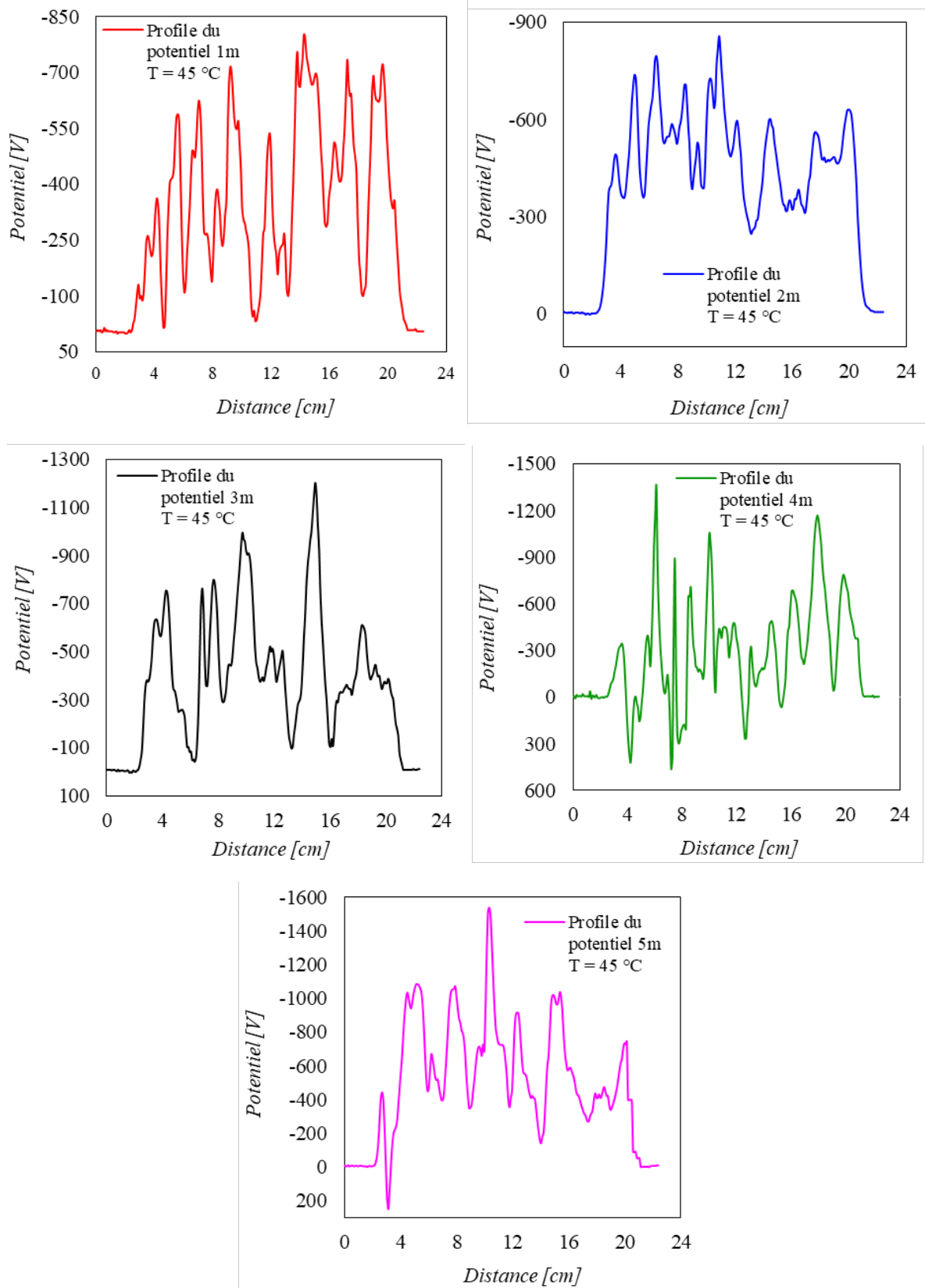


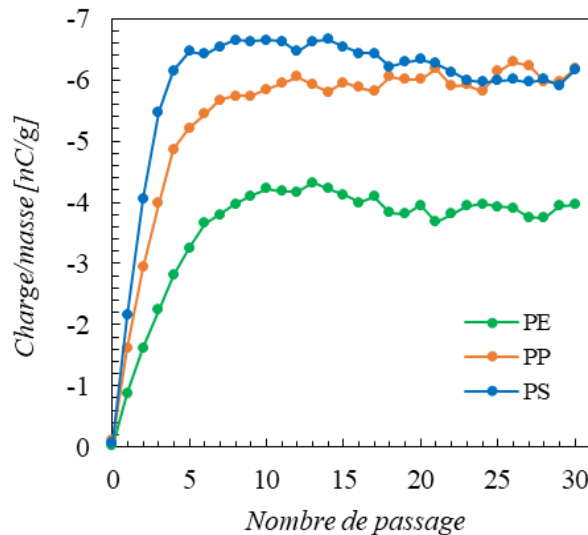
Figure III.11 : Profil du potentiel de surface d'un 30 g de particules de polypropylène de 1 m à 5 m, pour une température de tuyau galvanisé = 45°C.

Les **Figures (III.9 - III.11)** illustrent respectivement les résultats du profil de potentiel de surface d'un échantillon de particules de PP pesant 30 g après leur chargement triboélectrique dans un tube galvanisé, où l'échantillon de particules a été renouvelé pour chaque longueur de tuyau (1 m jusqu'à 5 m) et chaque température du tube galvanisé (20°C, 35°C et 45°C).

Les résultats illustrés dans les **Figures (III.9 - III.11)** démontrent de manière explicite que plus le tube galvanisé est long, plus la tribocharge des particules est élevée. En ce qui concerne l'impact de la température, il est observé que les graphiques indiquent une baisse de la charge triboélectrique des particules au fur et à mesure que la température du tube galvanisé augmente. Cela confirme la validité des résultats que nous avons observés précédemment sur la **Figure III.7**.

### **III.5 Charge de saturation**

Pour atteindre la charge de saturation, le même groupe de 30 g de particules passe à plusieurs fois dans un tube métallique galvanisé d'une longueur de 1 m jusqu'à ce que les particules soient saturées. Les résultats obtenus pour les trois matériaux sont présentés sur la **Figure III.12**. Bien que nous ayons utilisé le même poids d'échantillons de particules et même si les 3 types de particules utilisées ont des dimensions quasiment identiques et soient soumises aux mêmes conditions climatiques de laboratoire, le niveau de charge de saturation varie en fonction du matériau des particules. Les particules de PE saturent après 6 m de longueur à environ - 4 nC/g, les PP et PS saturent après seulement 4 à 5 m à environ - 5,5 nC/g à - 6,5 nC/g, respectivement. Ces résultats prouvent que la triboélectricité est un phénomène cumulatif, indiquant que la charge initiale ou l'historique des particules déterminent la charge triboélectrique résultante.



*Figure III.12 : Charge de saturation pour trois matériaux obtenus après l'avoir traversé plusieurs fois dans un tube galvanisé de 1m de long [RH = 43-44,5 % et T = 21,9-22,3 °C].*

### III.6 Prédiction de la tribocharge des polymères granulaires (PP) en mouvement dans un tube métallique galvanisé

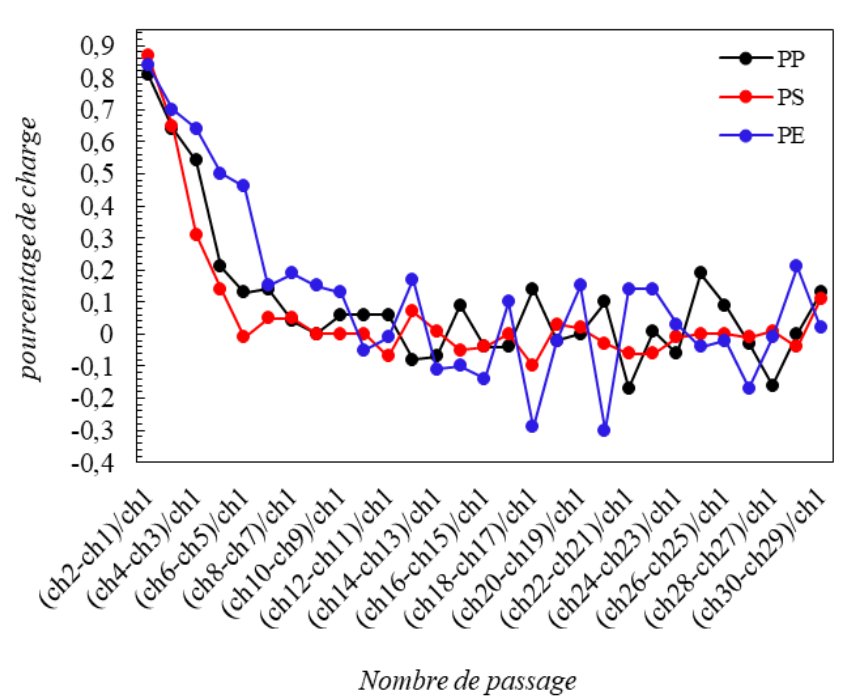
Cette section de l'étude se concentre sur la prédiction de la quantité de la charge triboélectrique engendrée lors du déplacement de particules à l'intérieur d'un tuyau métallique galvanisé à différentes températures. Pour cela, la tribocharge est modélisée à l'aide de deux méthodes différentes, à savoir Monte Carlo et Machine Learning. Ils ont été développés d'après des mesures expérimentales de la charge produite dans des longueurs et températures de canalisation variées. Les deux modèles établis peuvent bien s'adapter aux données mesurées et leur capacité de prédiction est suffisamment précise par rapport aux données mesurées. Les résultats obtenus sont prometteurs et prouvent la possibilité de prédire la tribocharge.

#### III.6.1 Modèle d'estimation de "Monte Carlo"

La méthode de Monte Carlo est principalement basée sur l'estimation de probabilité [159, 160]. Le modèle de prédiction développé est destiné à estimer la charge gagnée par les particules granulaires lors de leur parcours le long de l'installation métallique galvanisé à une température spécifique, tel qu'illustré dans la **Figure III.7**. Avant ça, apprécions la variation relative de la charge triboélectrique  $\Delta Q_T$  en se basant sur les courbes présentées dans la **Figure III.12** en soustrayant les valeurs et en divisant par la charge du premier mètre :

$$\Delta Q_{T_i} = \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{Q_1} \quad (\text{III.1})$$

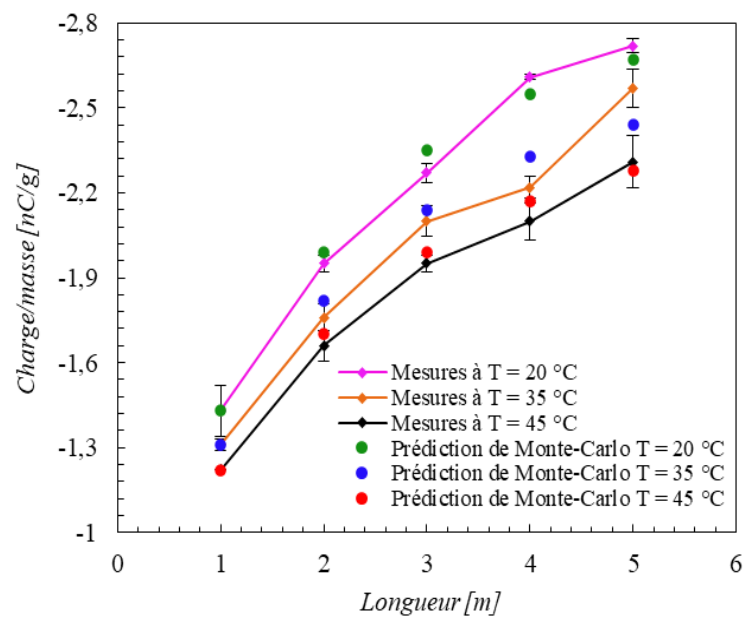
L'indice  $i$  désigne le nombre de passages, ou la longueur, et  $Q_i$  est la charge obtenue au premier mètre de distance. Les résultats obtenus sont présentés sur la **Figure III.13**. Le transfert de tribocharges  $\Delta Q_{T_i}$  du métal vers les particules diminue progressivement à mesure qu'elles se déplacent dans le tube. La quantité maximale de charges transférées est observée juste au premier mètre  $Q_1$ . À mesure que la surface de la particule se charge, la quantité de charge transférée diminue progressivement par rapport à la charge du premier mètre ( $Q_1$ ), et oscille autour de zéro à la saturation. Ce comportement est à la base du modèle de Monte Carlo établi.



*Figure III.13 : La variation relative de la charge triboélectrique.*

Ainsi, il est absolument impossible que la valeur de charge maximale de la longueur de mètre suivante ( $i+1$ ) dépasse la valeur de charge de la longueur précédente ( $i$ ). Par contre, la valeur de charge minimale acquise suite à la longueur ( $i+1$ ) est beaucoup moins que celle de la valeur de la longueur antérieure ( $i$ ) et a été appréciée à  $0.5 Q_i$ . Le modèle Monte Carlo permet d'estimer la valeur de la charge en se basant sur la probabilité que la valeur de charge suivante se situe entre les limites supérieure et inférieure :  $0.5 < Q_{i+1} < 1$ . Les prédictions effectuées par le modèle Monte Carlo concernant la répartition des charges le long d'une installation de 5 m

pour diverses températures sont illustrées dans la **Figure III.14**. Les mesures effectuées concordent bien avec les valeurs prédites.

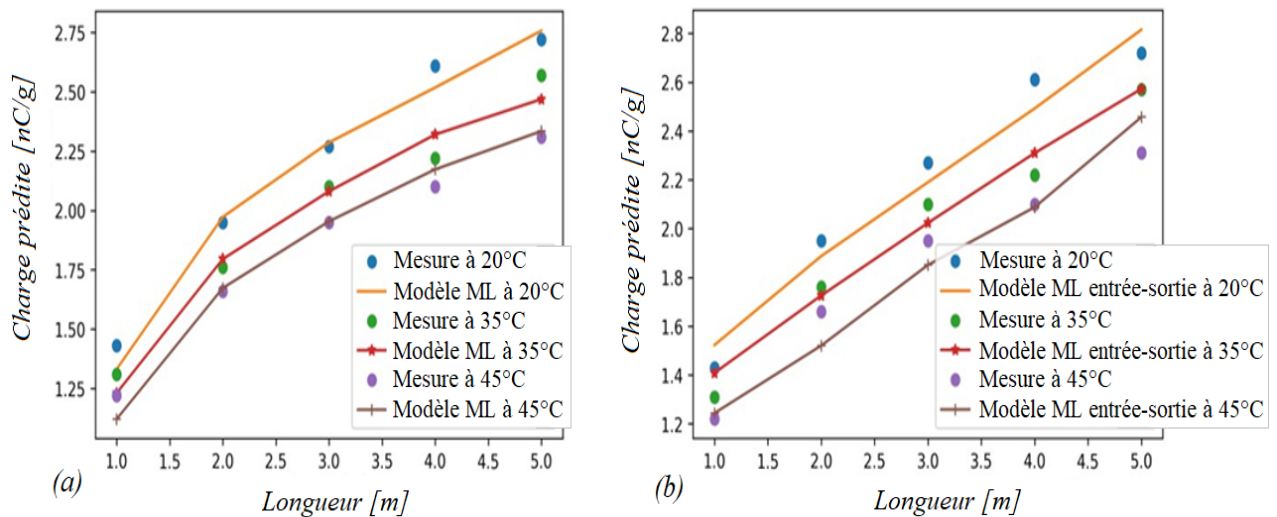


*Figure III.14 : Résultats de prédiction obtenus en utilisant le modèle de Monte Carlo.*

### III.6.2 Modèle de prédiction par “Machine-learning”

Le principe du machine learning (ML) consiste à entraîner l'ordinateur via des algorithmes spécifiques pour prédire des valeurs ou des classes d'espèces sur la base des données recueillies [161]. Dans le cas où le modèle de prédiction vise des valeurs continues, on se sert d'algorithmes de régression. Parmi eux, la machine à vecteurs de support (SVM) [162] est appliquée à notre problème de prédiction car elle correspond bien aux données mesurées. On entraîne le modèle en se basant sur les résultats de mesure exposés dans la **Figure III.7**. Dans notre système de mesure, le traitement de l'ensemble de données d'entraînement peut se faire de deux façons distinctes. La manière la plus simple consiste à considérer toute la distance comme un système monobloc avec des valeurs de charge mesurées au début de l'installation (premier mètre) et à la terminaison (dernier mètre). Dans ce cas, la charge en entrée pour toutes les longueurs étudiées sera la charge des échantillons vierges. Cette manière de présentation sera appelée modèle d'entrée-sortie. La deuxième manière consiste à considérer chaque tube de 1 mètre comme un système distinct dans lequel la charge à l'entrée provient de la sortie du tube précédent. Cette présentation séquentielle vient de l'idée que la tribocharge est cumulative, comme présenté dans les sections précédentes. On parlera alors de modèle séquentiel. La

comparaison entre les données mesurées et prédites pour les deux manières de présentation des données est illustrée sur la **Figure III.15**. Le modèle séquentiel avec un score de prédiction de 97 % peut mieux ajuster les mesures et suivre la courbe de quasi-saturation. Le modèle entrées-sorties a plutôt un comportement linéaire même avec un score de prédiction de 96 %. Par conséquent, la manière dont l'ensemble de données est préparé pour entraîner le modèle peut affecter de manière significative le comportement et la qualité du modèle final. Comme l'ensemble de données d'entraînement n'inclut pas la phase de saturation, les modèles ne devraient pas prédire des valeurs exactes au-delà de 5 m. Dans une installation à l'échelle d'un laboratoire, il est difficile de chauffer uniformément et d'entretenir la température de manière constante pour des tubes de plus de 5 m de longueur.

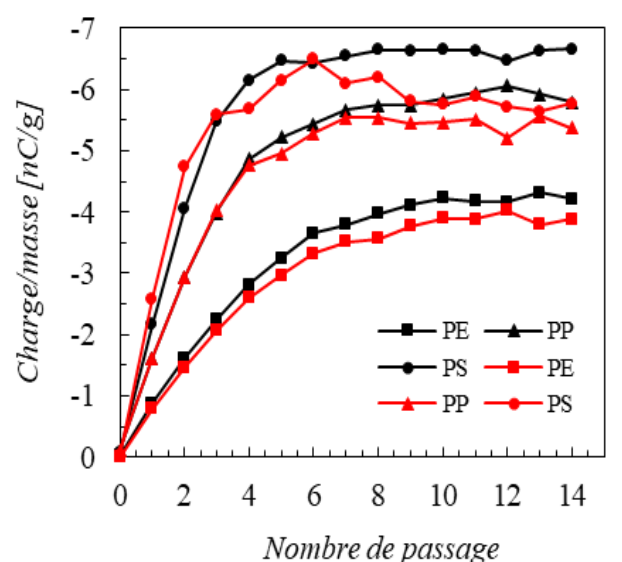


**Figure III.15 :** Courbes de prédiction par “Machine-learning” (a) modèle séquentiel et (b) modèle d'entrée-sortie.

### III.7 Influence des conditions ambiantes sur la charge des particules

#### III.7.1 Tube galvanisé avec les particules de PP, PS, PE

La **Figure III.16** montre la variation de la charge massique des particules de polypropylène (PP), de polyéthylène (PE) et de polystyrène (PS) pour deux expériences indépendantes les unes des autres menées dans des conditions ambiantes différentes en laboratoire, en fonction du nombre de passages pour le cas d'un tube galvanisé de 1 m de long.



*Figure III.16 : La variation de la charge massique des granules de PP, PS et PE pour deux expérimentations distinctes en termes des conditions ambiantes dans le laboratoire, en fonction du nombre de passage (cas du tuyau galvanisé de 1 m de longueur).*

Les graphiques de couleur **noire** illustrés sur la **Figure III.16** exposent la charge triboélectrique des échantillons de 30 g de PP, de PS et de PE en contact avec le tube galvanisé lors de l'expérience menée sous des conditions ambiantes en laboratoire, qui varient dans l'intervalle suivant : [RH = 43-45 % et T = 21,5-22,5 °C].

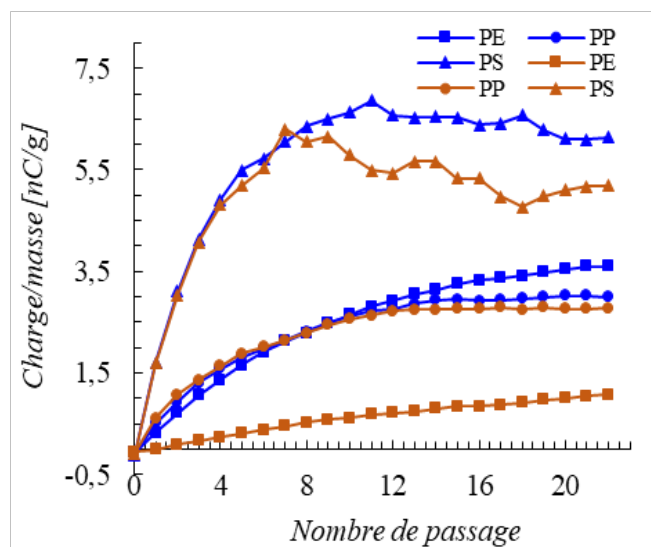
Tandis que les graphiques en **rouge** présentés sur la **Figure III.16** illustrent la charge des échantillons de 30 g de granules de polypropylène, de polystyrène et de polyéthylène en contact avec le tuyau galvanisé, lors de l'expérience menée sous les conditions ambiantes du laboratoire, qui se situent dans la plage suivante : [RH = 37-39 % et T = 23 -23,5 °C].

Les résultats de la **Figure III.16** indiquent que la réduction de l'humidité relative et l'élévation de la température ambiante au sein du laboratoire entraînent une baisse de la tribocharge des particules de PS, de PP et de PE.

En ce qui concerne l'accroissement de la température du laboratoire, qui a eu un effet réducteur sur la tribocharge des particules, c'est la même observation que nous avons observée précédemment concernant l'impact de la température du tube galvanisé sur la charge triboélectrique des particules de polypropylène dans le **paragraphe III.4**.

### III.7.2 Tube en PVC avec les particules de PP, PS, PE

La **Figure III.17** illustre la variation de la charge massique des particules de PE, PS et PP pour deux expériences avec des conditions ambiantes différentes en laboratoire, en fonction du nombre de passages dans un tube en PVC d'une longueur de 1 m.



*Figure III.17 : Variation de la charge massique des particules de PE, PP et PS pour deux différentes expérimentations en termes des conditions ambiantes en laboratoire, en fonction du nombre de passages (cas du tuyau en PVC d'une longueur de 1 m).*

Les courbes en **bleu** illustrées sur la **Figure III.17** exposent la charge des échantillons de 30 g de particules de PE, de PS et de PP en utilisant un tube en PVC lors de l'expérience menée sous les conditions ambiantes du laboratoire, qui varient dans l'intervalle suivant : [RH = 33-36,5 % et T = 23,5-24 °C].

Alors que les graphiques représentés en couleur **orange** sur la **Figure III.17** illustrent la charge triboélectrique des échantillons de 30 g de granules de polystyrène, de polypropylène et de polyéthylène pour le cas où l'on utilise le tube en PVC lors de l'expérience menée sous les conditions ambiantes en laboratoire, qui se situent dans la plage suivante : [RH = 37,5-41,5 % et T = 23-23,5 °C].

Les résultats présentés dans la **Figure III.17** indiquent une diminution de la charge de PP, de PE et de PS lorsque l'humidité relative dans le laboratoire augmente et la température dans celle-ci diminue.

Les résultats de la **Figure III.17** sont complètement opposés à ce que nous avons observé dans les résultats du tube galvanisé avec les granules de PP, de PS et de PE (**Figure III.16**). Cela confirme que le matériau du tuyau a aussi une incidence sur la charge triboélectrique.

## Conclusions

Cette étude a porté sur l'impact de la température et de la longueur du tuyau galvanisé sur la charge triboélectrique des particules de polypropylène (PP). Ainsi que sur la prédiction de la tribocharge des particules en mouvement à l'intérieur du tuyau galvanisé avec deux modèles de prédiction différents. Suivie d'une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits obtenus. De plus, l'étude de l'incidence des conditions ambiantes sur la charge des particules. Les résultats principaux sont synthétisés de la manière suivante :

- Lorsque la longueur du tuyau galvanisé augmente, le temps nécessaire aux particules pour le traverser ainsi que leur vitesse à l'intérieur du tube augmentent également.
- Lorsque la température à l'intérieur du tuyau s'accroît, on observe une diminution de l'humidité relative à son intérieur, peu importe sa longueur.
- L'accroissement de la longueur du tube galvanisé provoque une augmentation de la charge de particules de polyéthylène (PE), en raison du temps de contact accru entre les particules et la paroi intérieure du tuyau.
- L'augmentation de la longueur du tuyau en polychlorure de vinyle (PVC) entraîne un accroissement de la charge de particules de polypropylène (PP).
- Plus le tube galvanisé est long, plus la charge triboélectrique des particules de polypropylène s'accroît.
- À mesure que la température du tube galvanisé accroît, la charge acquise par les particules de PP diminue progressivement.
- Bien que les particules aient approximativement la même taille et se trouvent dans des conditions similaires, leur niveau de charge de saturation varie en fonction du matériau de particules et de leur type.
- Les résultats de la prédiction de la charge triboélectrique des particules qui ont été obtenus en utilisant à la fois le modèle d'estimation de "Monte Carlo" et le modèle de prédiction par "Machine-learning" sont prometteurs et prouvent la possibilité de prédire la tribocharge.

- Les valeurs prédites par le modèle d'estimation de “Monte Carlo” sont en bon accord avec les mesures.
- Pour le modèle de prédiction par “Machine-learning” : le modèle séquentiel avec un score de prédiction de 97 % peut mieux ajuster les mesures et suivre la courbe de quasi-saturation. Le modèle entrée-sortie a plutôt un comportement linéaire même avec un score de prédiction de 96 %.
- Dans le cas du tuyau galvanisé en contact avec les granules de PS, PP et PE, la réduction de l'humidité relative et l'élévation de la température à l'intérieur du laboratoire ont pour effet de réduire la charge triboélectrique des particules de PP, PE et PS.
- Pour le cas du tuyau en PVC avec les granules de PP, PS et PE, la charge de ces granules diminue lorsque l'humidité relative dans le laboratoire augmente et la température dans celle-ci diminue.

## **CHAPITRE IV**

# **Impact de la Charge Initiale, de la Quantité Massique, de L'angle d'Inclinaison du Tuyau et du Type de Particules Sur la Charge de Saturation d'un Groupe de Particules Millimétriques dans un Tube Incline**

# Chapitre IV

## **Impact de la Charge Initiale, de la Quantité Massique, de L'angle d'Inclinaison du Tuyau et du Type de Particules Sur la Charge de Saturation d'un Groupe de Particules Millimétriques dans un Tube Incliné**

**B**ien que des études aient signalé que la charge initiale des particules joue un rôle dans la quantité de charge transférée pendant le processus de chargement des particules [163, 164], l'étude du rôle de la charge initiale dans l'accumulation de la charge triboélectrique requiert encore une enquête plus approfondie.

La charge de saturation d'un matériau est une quantité importante liée à la charge triboélectrique. La charge de saturation correspond à la valeur maximale de charge qu'une surface peut atteindre lorsque le transfert de charge triboélectrique a cessé. Cette limite de saturation est en fait la charge à l'état stable pour un matériau donné lorsqu'il est continuellement chargé triboélectriquement contre un autre matériau spécifié [165].

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux des études qui ont été réalisées à l'aide de l'installation expérimentale illustrée dans la **Figure II.5** du **Chapitre II**. Les résultats mettent en évidence l'impact de la charge initiale, de la quantité massique des particules, de l'angle d'inclinaison du tuyau et du type de particules sur la charge de saturation d'un ensemble de particules de taille millimétrique se déplaçant à travers un tuyau incliné d'une longueur de 1 m. Dans le contexte de ce chapitre, on prend également en compte la polarité de la charge initiale ainsi que la constante de temps  $\tau$ .

## IV.1 Modèle d'ajustement

La charge nette d'une particule isolante roulant ou glissant sur une surface à vitesse constante est liée à l'équilibre entre la charge par effet triboélectrique et la décharge due aux chemins de fuite provoqués par les conditions environnementales. En conséquence, la variation de charge peut être exprimée de la manière suivante [124] :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{Q_s - Q}{\tau_c} - \frac{Q}{\tau_d} \quad (\text{IV.1})$$

Où  $Q$  représente la charge des particules,  $Q_s$  est la valeur de saturation ou la charge d'équilibre, tandis que  $\tau_c$  et  $\tau_d$  désignent respectivement des constantes de temps de charge et de décharge. L'équation peut être simplifiée de la manière suivante :

$$\tau_c \frac{dQ}{dt} + \left(1 + \frac{\tau_c}{\tau_d}\right) \cdot Q = Q_s \quad (\text{IV.2})$$

La solution de cette équation différentielle du premier ordre (2) avec la condition initiale  $t = 0, Q = Q_0$ , donne l'expression suivante :

$$Q(t) = (Q_0 - Q_s) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + Q_s \quad (\text{IV.3})$$

Où  $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_d}$ .  $\tau$  est la constante de temps de l'ensemble du processus.

Dans le cas de charges de particules par impacts multiples avec une surface, l'évolution de la charge peut être exprimée en fonction du nombre d'impacts comme suit [25] :

$$Q(n) = (Q_0 - Q_s) \cdot \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right) + Q_s \quad (\text{IV.4})$$

Avec  $n$  est le nombre de collisions et  $n_0$  est le nombre d'impacts caractéristiques.

Une expression similaire a été établie pour les particules circulant dans un tuyau [166] :

$$Q(L) = (Q_0 - Q_s) \cdot \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) + Q_s \quad (\text{IV.5})$$

Où  $L$  est la longueur du tuyau et  $L_0$  est une longueur caractéristique.

Si un groupe de particules passe à plusieurs reprises à travers un tube de 1 m de long, la charge triboélectrique augmente jusqu'à saturation selon l'équation (IV.3). Si la particule met  $T$  secondes pour traverser le tube et que la charge acquise est  $Q_I$ , la prochaine fois qu'elle

traversera le tube sera  $2.T$ , ce qui entraînera une nouvelle valeur de charge  $Q_2$ , et ainsi de suite.

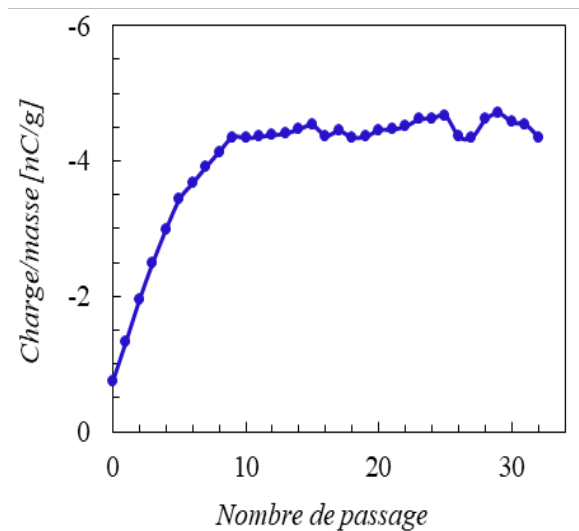
Par conséquent, l'équation (IV.3) pourrait s'écrire :

$$Q(t) = (Q_0 - Q_s) \cdot \exp\left(-\frac{N \cdot T}{\tau}\right) + Q_s \quad (\text{IV.6})$$

$N$  est le nombre de fois où les particules traversent le tube. À chaque passage des particules à travers le tube d'une longueur de 1 m,  $N$  est incrémenté d'un de sorte que  $t = N.T$ .

## IV.2 Accumulation de charge triboélectrique

La charge triboélectrique acquise par les particules de polypropylène (PP) après un passage successif dans un tuyau de cuivre d'une longueur de 1 m est illustrée dans la **Figure IV.1**. Les résultats montrent que les granulés de PP acquièrent une charge négative lors de leur passage dans le tube métallique. La charge continue d'augmenter jusqu'à saturation vers -5 nC/g après environ 10 m, ou passages. Cela prouve que la triboélectrification est un phénomène cumulatif qui dépend de la charge initiale ou de l'historique des particules.



*Figure IV.1 : Accumulation de la charge triboélectrique sur des particules de polypropylène de 30 g acquise suite à des passages répétés à travers un tuyau en cuivre.*

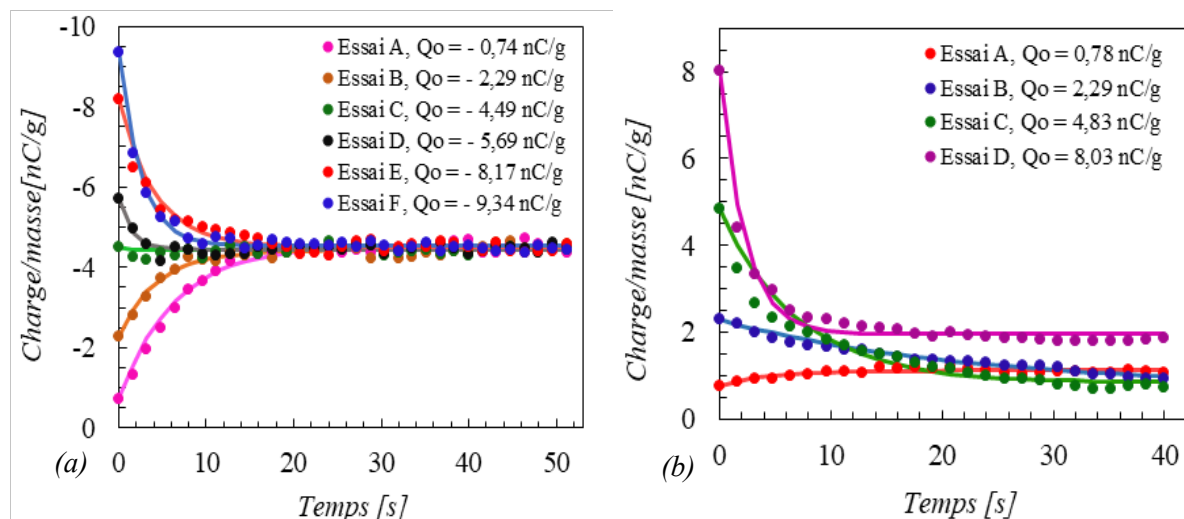
## IV.3 Influence de la charge initiale sur la charge de saturation des particules (Tube de cuivre)

### IV.3.1 Charge initiale obtenue par décharge corona

### IV.3.1.1 Polarité identique entre la charge initiale et la charge de saturation

L'évolution de la charge est étudiée lorsque la polarité de la charge triboélectrique accumulée par les particules demeure inchangée suite à leur transit à travers le tube. L'invariance de signe signifie que depuis le début jusqu'à la saturation, les particules conservent la même polarité. Chaque passage de l'échantillon de 30 g dans le tube prend un temps moyen mesuré  $T = 1.6 s \pm 0.053$ . Ainsi, multiplier le nombre de passages et le temps moyen entraînerait la variation temporelle de la charge cumulée. La **Figure IV.2** montre les résultats expérimentaux et ajustés utilisant **l'équation (IV.6)** de la charge triboélectrique obtenue après le passage répété de 30 g d'échantillons de polypropylène à travers des tuyaux en cuivre et en PVC, avec diverses valeurs de charge initiale. La charge initiale a été modifiée à l'aide d'une décharge corona DC, comme mentionné ci-dessus. Il est évident que les particules de PP acquièrent une charge négative lorsqu'elles traversent un tube en cuivre, alors qu'elles sont chargées positivement lorsqu'elles transitent dans un tube en PVC. La polarité de charge observée concordait bien avec la série triboélectrique [167].

Comme prévu, l'accumulation de charge triboélectrique suit dans le bon sens le modèle exponentiel donné par **l'équation (IV.6)**. La charge de saturation est fonction de la combinaison de matériaux entre les particules et le tuyau. En fait, les particules de polypropylène saturent à environ  $-4.5 \text{ nC/g}$  contre le tube métallique, mais à moins de  $+2 \text{ nC/g}$  contre le tuyau en PVC. En outre, il est évident que la charge initiale a une influence sur le transfert de charge triboélectrique.



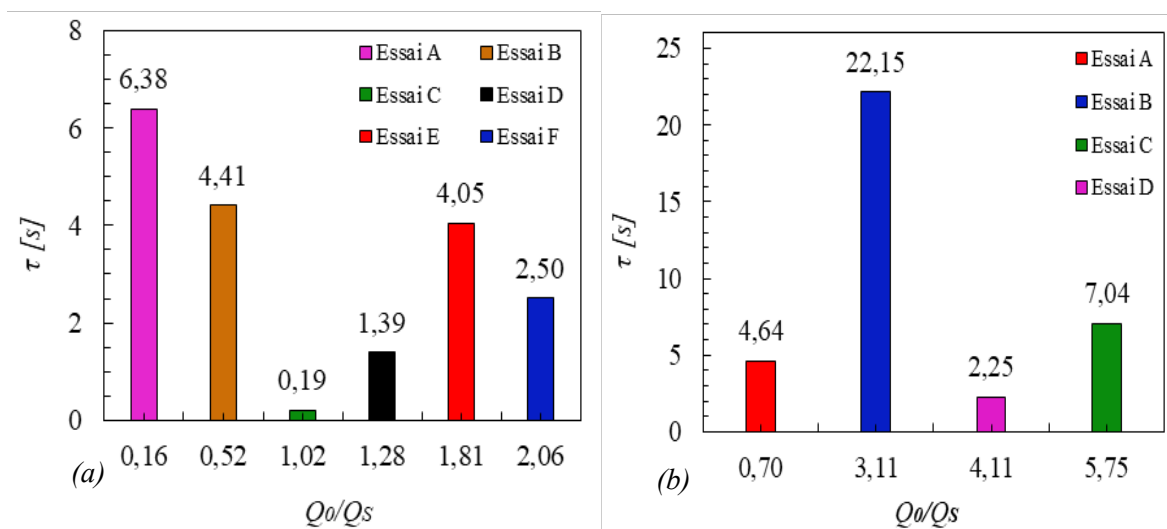
**Figure IV.2 :** Résultats d'expérience et d'ajustement utilisant l'équation (IV.6) montrant l'impact de la charge initiale sur l'accumulation de la charge triboélectrique sur des particules de polypropylène de 30 g de poids passées à maintes reprises à travers un tuyau d'une longueur de 1 m : (a) Tube de cuivre avec différentes charges initiales négatives déposées par décharge corona ; et (b) un tube en PVC avec différentes charges initiales positives déposées par décharge corona.

Lorsque les particules sont moins chargées, à chaque passage dans le tube, la charge augmente jusqu'à saturation. Cela signifie que les particules continuent d'acquérir une charge grâce à de multiples contacts avec le tube. A l'inverse, lorsque les particules sont fortement chargées, leur charge diminue jusqu'à atteindre l'équilibre, ou charge de saturation, ce qui signifie que les particules perdent leur charge après chaque passage. Ce comportement de charge ou de décharge est contrôlé par le rapport des charges initiales et de saturation  $Q_0/Q_s$ . Lorsque la charge initiale  $Q_0$  est inférieure à la charge de saturation  $Q_s$ , les particules sont chargées, mais lorsque  $Q_0$  est supérieure à  $Q_s$ , les particules sont déchargées. Un cas particulier s'engendre au cas où la charge initiale se situe dans la plage de la charge de saturation ( $Q_0 \approx Q_s$ ). Dans cette situation, la charge reste au même niveau, ce qui signifie que le transfert de charge est faible ou varie entre le régime de charge et le régime de décharge dans un intervalle étroit.

L'ajustement des résultats obtenus à l'équation (IV.6) permet de déterminer la constante de temps ( $\tau$ ), qui est un indicateur de la vitesse à laquelle le processus peut atteindre la saturation ou l'équilibre. La Figure IV.3 représente les valeurs de constante de temps obtenues correspondant aux courbes de la Figure IV.2 pour les tubes en cuivre et en PVC en fonction du rapport  $Q_0/Q_s$ . La triboélectrification met quelques secondes pour atteindre la charge d'équilibre, mais globalement, la constante de temps dépend du rapport  $Q_0/Q_s$ . Une charge initiale inférieure par rapport à la charge de saturation conduit à un temps constant de l'ordre de 4–6 s pour les tubes en cuivre et en PVC. Étonnamment, des charges initiales plus élevées par rapport à la saturation ( $Q_0 > Q_s$ ) entraînent une constante de temps plus faible dans le cas du tube en cuivre, globalement inférieure à 4 secondes. Cela implique que le régime de décharge, engendré par la perte de charge, est plus rapide que le régime de charge, au cours duquel la charge s'accumule sur les particules. Quand la charge initiale se situe dans la même plage que la charge de saturation ( $Q_0/Q_s \approx 1$ ), les variations de charge observées sont trop faibles, ce qui entraîne une charge quasi constante sur les particules. Cette analyse est assez difficile à réaliser pour le tube PVC, en raison de la dépendance légère de la charge finale  $Q_s$  par rapport à la charge initiale.

Les résultats concernant la variation de charge (Figure IV.2) ou des constantes de temps (Figure IV.3) suggèrent que les propriétés de tribocharge évoluent en fonction de l'état de charge initial d'une combinaison de matériaux spécifiques. La décharge de particules se produisant à des charges initiales plus élevées ( $Q_0 > Q_s$ ) est assez intéressante. Sur la base du modèle de transfert d'électrons [168], l'évolution de la tribocharge remarquée en fonction de la charge initiale a pu être parfaitement expliquée. En effet, la quantité et la direction du transfert

d'électrons sont toutes deux contrôlées par l'énergie de surface des deux matériaux en contact, variant en fonction du travail de sortie et du niveau de Fermi [168]. Les électrons sont transférés des niveaux d'énergie supérieurs aux niveaux d'énergie inférieurs. Cela implique que les particules initialement très chargées ont une énergie plus élevée, conduisant à un transfert de charge des particules vers le tuyau, ce phénomène explique le régime de décharge. Quand les deux matériaux parviennent à un équilibre au niveau de leur énergie de surface, le processus de transfert de charge s'arrête, ce qui entraîne ainsi l'atteinte de l'état de saturation. Au cas où la charge initiale des particules est du même ordre que la charge de saturation, les deux matériaux ont la même énergie de surface, ce qui entraîne un transfert de charge très faible.

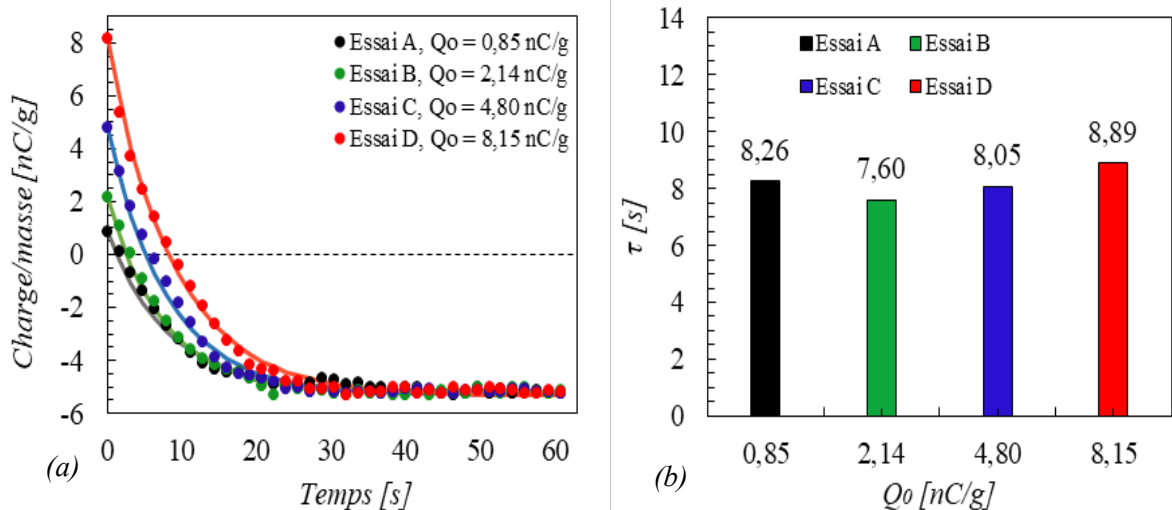


*Figure IV.3 : Résultats d'ajustement montrant la constante de temps  $\tau$  en fonction du rapport  $Q_0/Q_s$ : (a) particules dans un tube en cuivre et (b) particules dans un tube en PVC.*

### IV.3.1.2 Polarité opposée entre la charge initiale et la charge de saturation

Il est envisageable que la charge initiale d'un groupe de particules soit de polarité opposée à celle de la charge de saturation induite par le phénomène de tribochargement. Les courbes présentes dans la **Figure IV.4** représentent la variation de la charge triboélectrique et les constantes de temps correspondantes en fonction de la charge initiale de polarité opposée. Des décharges corona DC de polarité positive et négative ont été utilisées pour charger les particules. Des résultats antérieurs montrent que les particules sont chargées négativement lorsqu'elles voyagent à l'intérieur du tube en cuivre, alors qu'une charge positive est obtenue lorsqu'elles voyagent dans le tube en PVC. En conséquence, les particules étaient chargées positivement et négativement sur la base des expériences des tubes en cuivre et en PVC,

respectivement. Dans le cas d'un tube en cuivre (**Figure IV.4 (a)**), la charge triboélectrique diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle soit s'annule puis augmente dans la polarité opposée, suivant la forme exponentielle jusqu'à saturation. La charge de saturation est exactement la même que précédemment lorsqu'elle a le même signe que la charge initiale (**Figure IV.2**). Les valeurs de constante de temps correspondantes (**Figure IV.4 (b)**) sont proches. La capacité de la triboélectrification à inverser la charge est une caractéristique intéressante, notamment la diminution de la charge jusqu'à dépasser zéro. Cette capacité à neutraliser les particules a été proposée précédemment [165] pour contrôler la triboélectrification en utilisant différents matériaux. Cependant, les particules circulant à l'intérieur du tube PVC présentent un comportement légèrement différent (**Figure IV.4 (c)**). La charge commence avec des valeurs négatives et tend à atteindre la saturation du côté positif. L'ensemble des particules de faible charge initiale (inférieure à  $-2 \text{ nC/g}$ ) franchit la ligne zéro, se recharge dans le signe opposé, et finalement sature avec une valeur positive. À l'inverse, les particules fortement chargées ( $-4 \text{ nC/g}$  à  $-8 \text{ nC/g}$ ) de la **Figure IV.4 (c)** montrent une diminution de leur charge, mais ne franchissent pas zéro comme dans les cas précédents, pour finalement saturer avec un signe négatif, la même chose que la charge initiale. Cette saturation précoce pourrait résulter de la saturation du tube PVC lui-même. Avec le tube PVC, la constante de temps est élevée dans le cas d'une charge initiale inférieure à  $-2 \text{ nC/g}$ , valeur proche de la saturation, mais elle diminue à mesure que la charge initiale augmente (**Figure IV.4 (d)**).



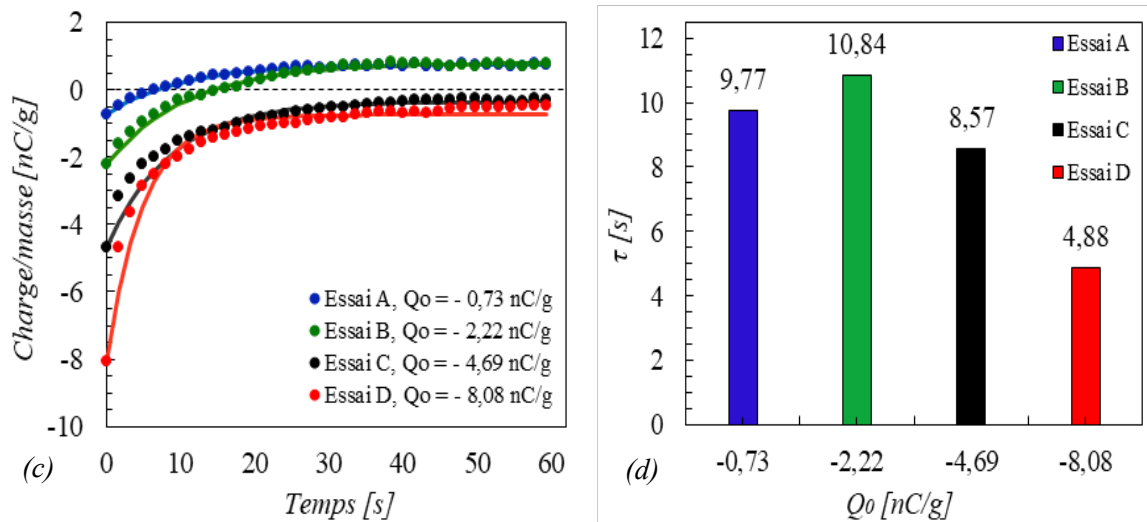


Figure IV.4 : Variation de la tribocharge à partir de la charge initiale déposée par décharge couronne de polarité opposée à la charge de saturation, (a), (b) tube en cuivre et (c), (d) tube en PVC.

### IV.3.2 Charge initiale obtenue par triboélectrification

La Figure IV.5 montre l'évolution de la charge de particules initialement tribochargées dans un tube en PVC puis passées dans le tube en cuivre. Le résultat prouve que les conclusions précédentes basées sur la charge initiale obtenue par une décharge corona sont également valables avec des particules initialement chargées par un effet triboélectrique. La seule distinction remarquable réside dans la valeur de la constante de temps, qui est plus faible pour presque la même charge initiale que le cas chargé par décharge couronne (Figure IV.4 (b)).

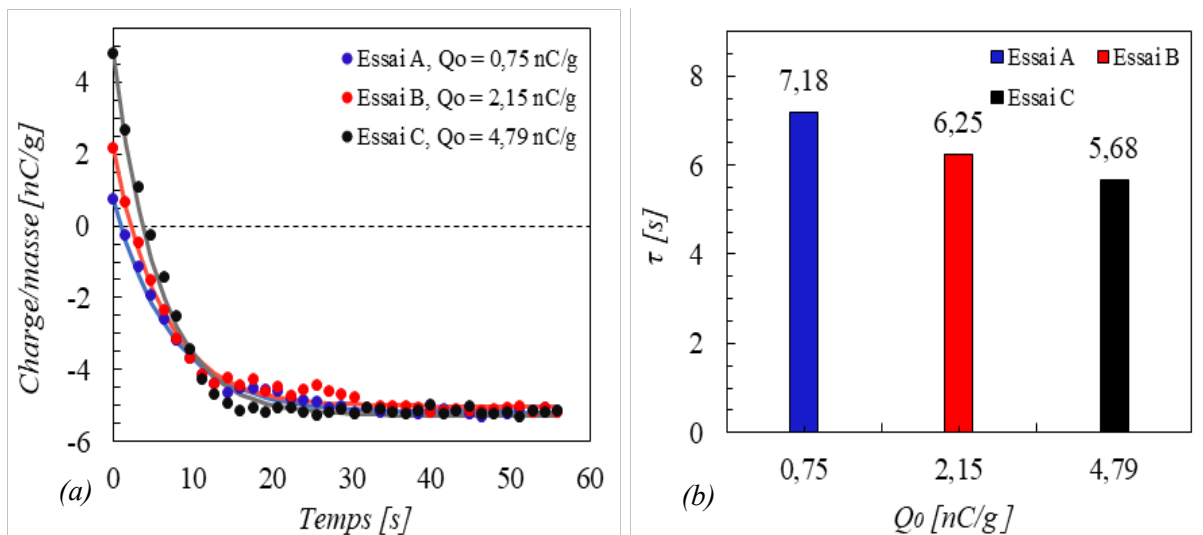


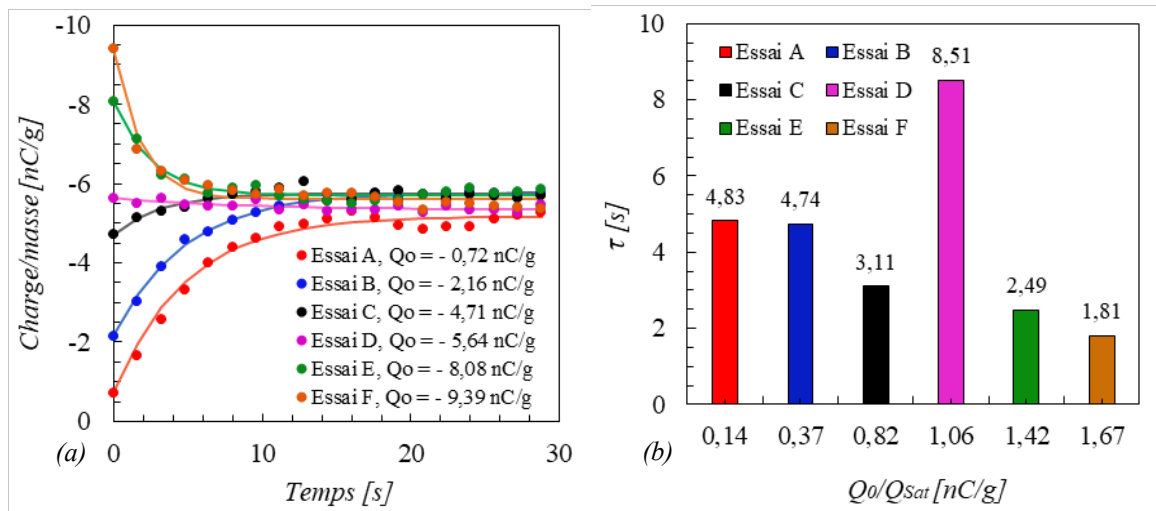
Figure IV.5 : Charge initiale obtenue par triboélectrification contre un tube en PVC puis passée dans le tube en cuivre : (a) la variation de la tribocharge depuis une charge initiale de polarité opposée jusqu'à la charge de saturation pour le cas d'un tuyau en cuivre ; et (b) les valeurs des constantes de temps qui leur correspondent.

En situation où la polarité change (devient polarité opposée), il est observé que la constante de temps varie dans une plage de valeurs clairement réduite, comme le montre la **Figure IV.4 (b)**. Par rapport au cas de même polarité, où de grandes variations sont observées, le changement de polarité semble avoir une vitesse de variation plus proche à partir de diverses valeurs de la charge initiales.

## **IV.4 Influence de la charge initiale sur la charge de saturation des granules (Tube galvanisé / Tube PVC)**

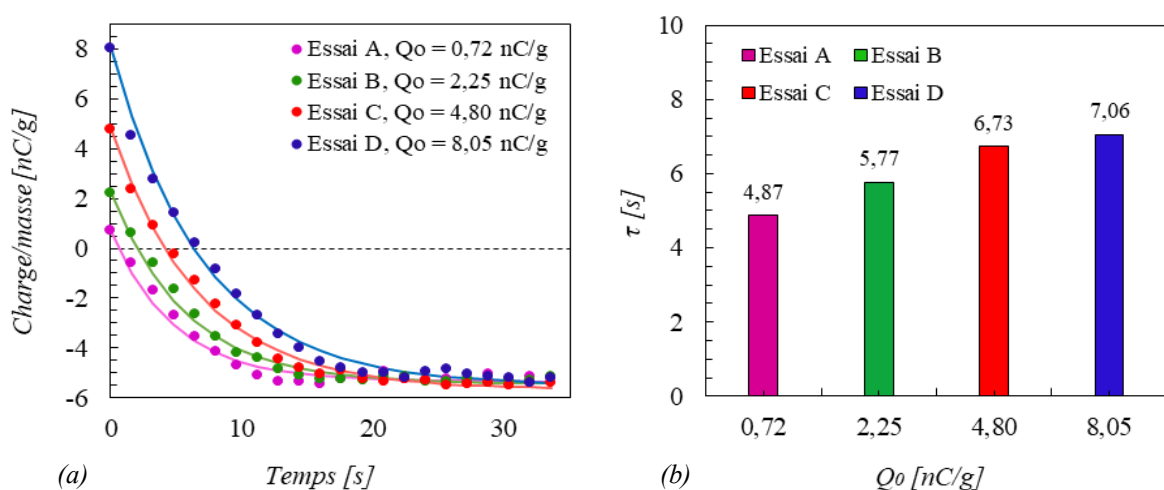
### **IV.4.1 Charge initiale obtenue par décharge corona**

La **Figure IV.6** présente les résultats expérimentaux et l'ajustement pour le tube galvanisé à l'aide du modèle d'ajustement, montrant l'influence de la charge initiale obtenue par décharge corona négative (**Figure IV.6 (a)**), et les valeurs de constante de temps qui leur correspondent (**Figure IV.6 (b)**). Les 30 g de particules de polypropylène sont initialement chargées à l'aide d'une décharge corona négative DC [146]. Les résultats présentés dans la **Figure IV.6** apparaissent une tendance distinctive et particulière de la charge triboélectrique. En réalité, peu importe la valeur de la charge initiale, les particules sont susceptibles d'atteindre le même niveau de charge de saturation, lequel varie en fonction de la combinaison des matériaux. Les particules de polypropylène et le tuyau galvanisé entraînent une saturation d'environ -6 nC/g. Néanmoins, la variation de la charge varie en fonction de la relation relative entre la charge initiale  $Q_0$  et la charge de saturation  $Q_{sat}$ . Lorsque  $Q_0$  est inférieure à  $Q_{sat}$ , les particules continuent d'acquérir une charge après chaque passage jusqu'à atteindre la saturation. Inversement, lorsque  $Q_0$  est supérieure à  $Q_{sat}$ , les particules perdent continuellement de la charge jusqu'à ce qu'elle se stabilise à  $Q_{sat}$ . Entre ces deux cas, il existe un cas où  $Q_0$  est du même ordre que  $Q_{sat}$ . Dans ce cas, il semble que la triboélectricité soit très faible, puisque la charge des particules est maintenue quasiment constante même après plusieurs passages dans le tube galvanisé.



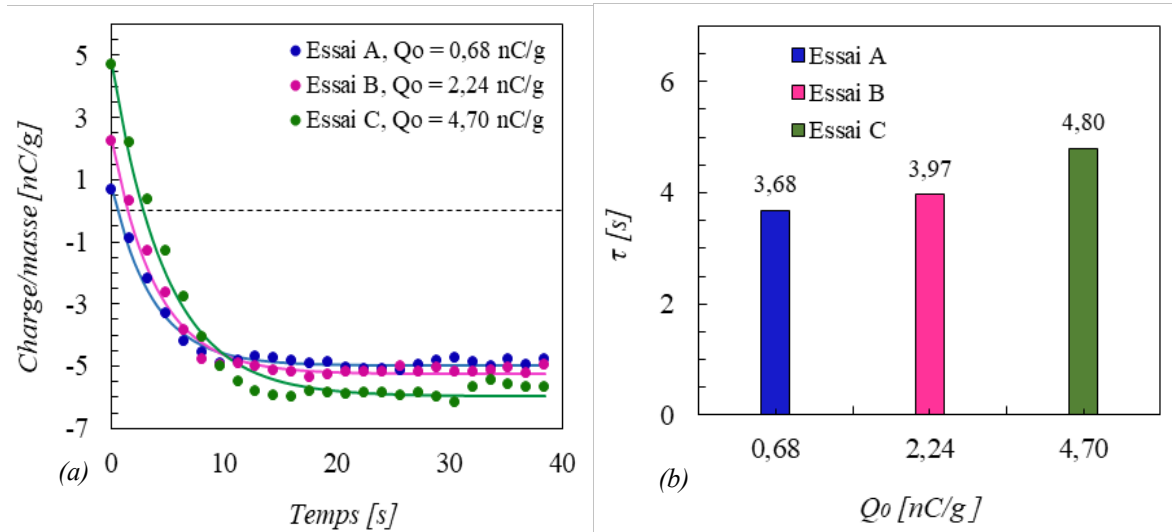
**Figure IV.6 :** Résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'influence de la charge initiale obtenue par décharge corona négative sur la charge de saturation d'un 30 g de particules de polypropylène soumises à plusieurs passages dans un tube galvanisé de 1 m [RH = 46,6 % et T = 19,3 °C] ; et (b) Représentant la constante de temps  $\tau$  en fonction de  $Q_0/Q_{Sat}$  pour le cas d'un tube galvanisé d'une longueur de 1 m.

Les résultats illustrés dans la **Figure IV.7** représentent l'impact de la charge initiale acquise à travers la décharge corona positive (**Figure IV.7 (a)**), et la constante de temps correspondant (**Figure IV.7 (b)**). Dans le cas où la charge initiale est obtenue par décharge corona positive (**Figure IV.7**), la charge triboélectrique diminue progressivement jusqu'à s'annuler, ensuite elle s'accroît dans la polarité inverse, selon une forme exponentielle, jusqu'à ce que la saturation soit atteinte. La charge de saturation est exactement la même que précédemment lorsqu'elle a le même signe que la charge initiale (**Figure IV.6**).



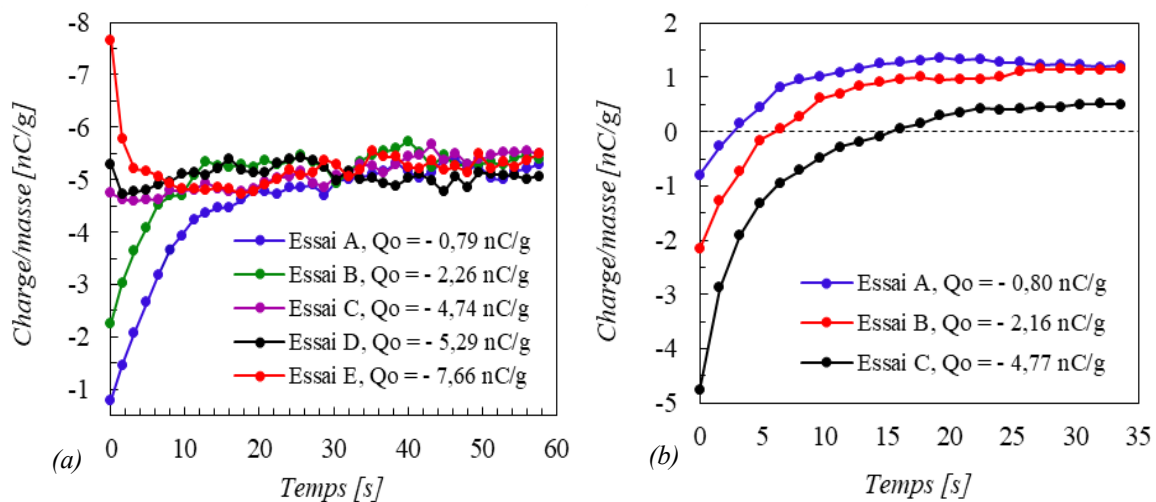
**Figure IV.7 :** Résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'influence de la charge initiale obtenue par décharge corona positive sur la charge de saturation d'un 30 g de particules de polypropylène passées à plusieurs fois dans un tube galvanisé de 1 m [RH = 44,9 % et T = 19,1 °C] ; et (b) Représentant la constante de temps  $\tau$  en fonction de  $Q_0$  pour le cas d'un tube galvanisé de 1 m.

#### IV.4.2 Charge initiale obtenue par triboélectrification



*Figure IV.8 : Charge initiale obtenue par triboélectrification par un tube en PVC puis passée dans le tube galvanisé de 1 m : (a) évolution de la charge triboélectrique à partir d'une charge initiale positive obtenue par un tuyau en PVC jusqu'à la charge de saturation [RH = 36,3 % et T = 21,6 °C] ; et (b) les valeurs des constantes de temps qui leur correspondent.*

La **Figure IV.8** illustre la variation de la charge de 30 g de particules de polypropylène qui ont été initialement tribochargées via un tuyau en PVC puis passées dans le tuyau galvanisé. La tribocharge diminue progressivement jusqu'à atteindre la saturation dans la polarité opposée. Le résultat montre que les conclusions précédentes concernant la charge initiale obtenue par décharge corona sont également valables pour le cas où la charge initiale est obtenue par triboélectrification.



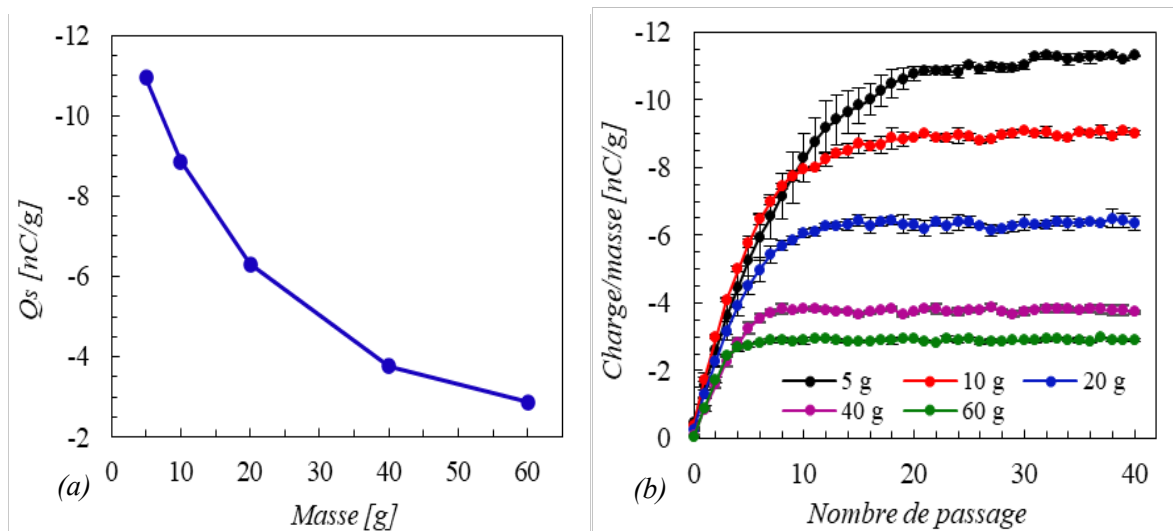
*Figure IV.9 : Charge initiale obtenue par triboélectrification par un tube galvanisé : (a) puis passée plusieurs fois dans un tube de cuivre de 1 m jusqu'à la saturation [RH = 34 % et T = 22,1 °C] ; et (b) puis passée plusieurs fois dans un tube en PVC de 1 m jusqu'à la saturation [RH = 55,2 % et T = 21,1 °C].*

La **Figure IV.9** présente la variation de la charge de 30 g de particules de polypropylène initialement chargées par triboélectrique à travers un tuyau métallique galvanisé, puis passées dans le tuyau en cuivre (**Figure IV.9 (a)**), et la **Figure IV.9 (b)** représente le cas quand les particules traversent le tuyau en PVC. Les résultats présentés dans la **Figure IV.9 (a)** sont identiques à ceux de la **Figure IV.6 (a)**, ils peuvent donc être interprétés de la même manière que nous avons interprété les résultats de la **Figure IV.6 (a)**. Concernant les résultats de la **Figure IV.9 (b)**, ils sont identiques à ceux de la **Figure IV.7 (a)** et de la **Figure IV.8 (a)**, donc ils peuvent être interprétés comme nous avons interprété les résultats de la **Figure IV.7 (a)** et de la **Figure IV.8 (a)**.

## **IV.5 Influence de la quantité massique sur la charge de saturation des particules de Polypropylène (PP)**

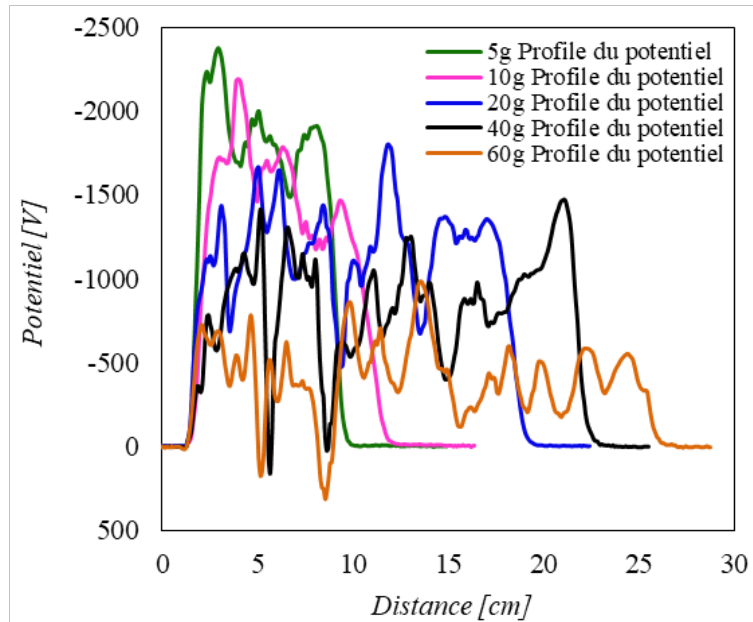
### **IV.5.1 Tube de cuivre**

Étant donné la présence de surfaces plus chargées en raison d'un accroissement de la quantité de particules, on peut anticiper une augmentation de la charge de saturation également. Les résultats ont cependant été exactement à l'opposé aux attentes. Les graphiques présentés dans la **Figure IV.10** illustrent la variation de la charge de saturation  $Q_s$  en fonction de la quantité massique, laquelle varie de 5 g à 60 g, pour le cas d'un tube en cuivre. Les échantillons ont été renouvelés à chaque expérience sans aucune charge initiale. Les résultats obtenus montrent une réduction de la charge de saturation en fonction de l'accroissement de la quantité de particules. L'accroissement de la quantité de particules de 5 g à 60 g entraîne une diminution de la charge de saturation de -11 nC/g à près de -2,5 nC/g, ce qui représente une réduction d'environ 77 %.



*Figure IV.10 : Résultats expérimentaux représentant l'impact de l'accroissement de la quantité massique sur la charge de saturation dans le cas d'un tuyau en cuivre : (a) La charge de saturation en fonction de la masse de 5 g à 60 g ; et (b) La charge massique en fonction du nombre de passages.*

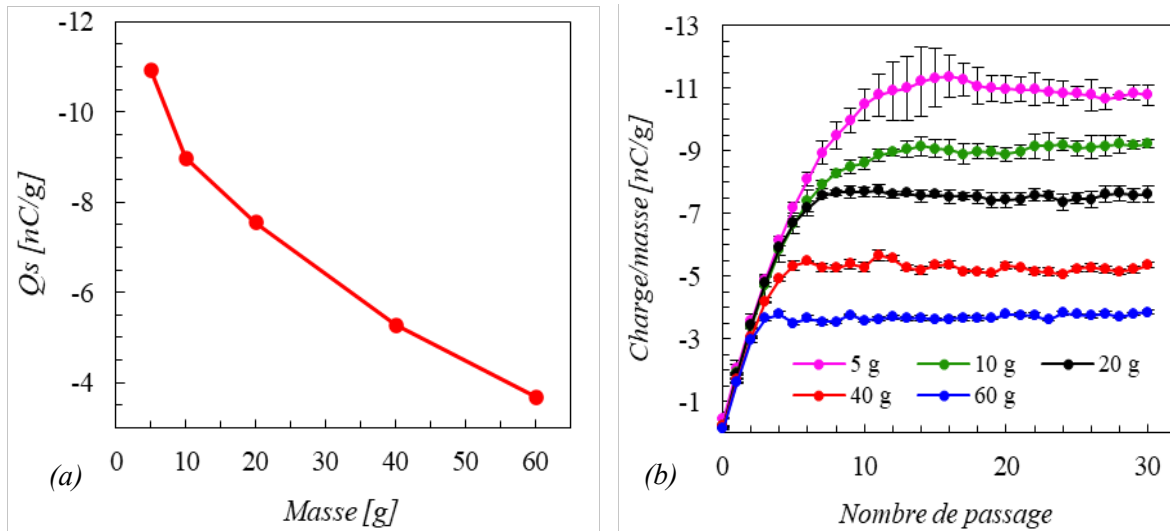
Dans le but d'approfondir la compréhension de ce phénomène, un profil de répartition du potentiel de surface a été effectué sur plusieurs échantillons. La répartition typique du potentiel enregistrée sur la surface d'échantillons pesant de 5 g à 60 g dans le cas d'un tube en cuivre est illustrée dans la **Figure IV.11**. Dans cette expérience, les particules se retrouvent alignées en monocouche sur une plaque métallique reliée à la terre. Les courbes de distribution de potentiel ont moins d'amplitude et deviennent plus irrégulières à mesure que la quantité augmente. Par exemple, le potentiel maximum enregistré pour un échantillon de 5 g est d'environ -2400 V, tandis que le potentiel maximum enregistré pour un échantillon de 20 g est d'environ -1800 V, alors que seulement -1000 V est enregistré pour un échantillon de 60 g. De surcroît, l'échantillon de 60 g exhibe un potentiel de surface irrégulier qui peut même changer de polarité dans certaines zones. Ces courbes de potentiel de surface suggèrent que les particules ne sont pas chargées uniformément lorsque leur quantité augmente. Augmenter le nombre de particules circulant à l'intérieur du tube réduirait la probabilité que des particules individuelles atteignent la paroi du tube et soient donc chargées. Une autre raison expliquant les irrégularités potentielles de surface pourrait être le contact entre les particules elles-mêmes, ce qui pourrait entraîner une tribocharge de polarités différentes sur différentes particules. Ce dernier mécanisme pourrait expliquer une éventuelle variation de signe ainsi que la diminution du niveau de saturation.



*Figure IV.11 : Distribution du potentiel de surface à la surface des échantillons de 5 g à 60 g, pour le cas d'un tube en cuivre.*

## IV.5.2 Tube galvanisé

Étant donné l'existence de surfaces plus chargées à cause de l'augmentation de la quantité de particules, il est également prévu que la charge de saturation s'accroisse. Pourtant, les résultats obtenus se sont avérés totalement contraires à l'expectation. Les courbes illustrées dans la **Figure IV.12** montrent l'évolution de la charge de saturation  $Q_s$  en fonction de la quantité massique allant de 5 g à 60 g, pour le cas d'un tuyau galvanisé. Les échantillons ont été renouvelés à chaque expérience. Les résultats obtenus ont démontré que la charge de saturation décroît à mesure que la quantité de particules augmente. L'élévation de la quantité de particules de 5 g à 60 g entraîne une baisse de la charge de saturation de -11 nC/g à approximativement -3,5 nC/g, cela représente une diminution d'environ 68 %.



*Figure IV.12 : Résultats expérimentaux représentent l'effet de l'accroissement de la quantité massique sur la charge de saturation dans le cas d'un tuyau galvanisé : (a) Variation de la charge de saturation en fonction de la quantité massique de 5 g à 60 g ; et (b) Variation de la charge massique en fonction du nombre de passages.*

On a effectué un profilage de la répartition du potentiel de surface sur plusieurs échantillons afin de mieux comprendre ce phénomène. La **Figure IV.13** présente la distribution du potentiel de surface mesuré sur la surface des échantillons dont le poids varie de 5 g à 60 g dans le cas d'un tuyau galvanisé. Dans cette expérience, les granules sont disposés en monocouche sur une plaque métallique mise à la terre. Le potentiel de surface maximum enregistré d'un échantillon de 5 g est d'environ -2600 V, tandis que le potentiel maximum enregistré pour un échantillon de 20 g est d'environ -1900 V, alors que seulement -1100 V est enregistré pour un échantillon pesant 60 g. L'échantillon pesant 60 g présente un potentiel de surface irrégulier qui peut changer de polarité dans certaines régions, ceci est contraire à ce qui apparaît dans le reste des masses. Ces observations sont expliquées en détail dans le **paragraphe IV.5.1.2**.

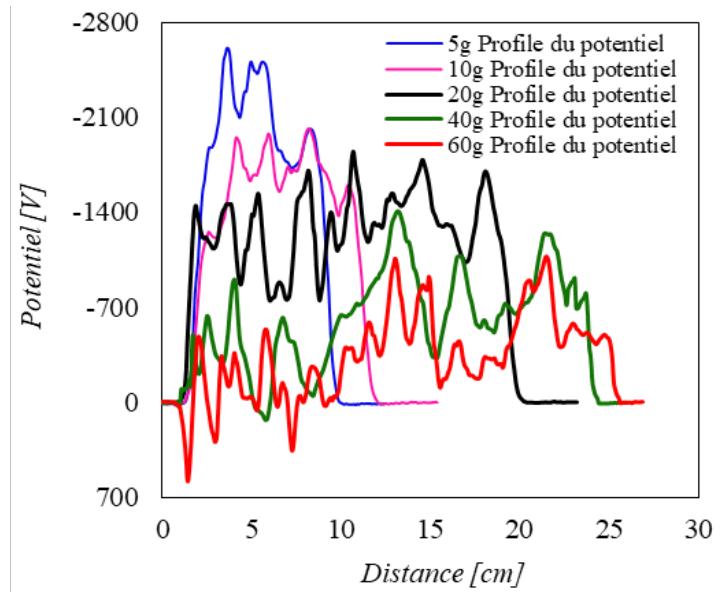


Figure IV.13 : Distribution du potentiel de surface à la surface des échantillons pesant de 5 g à 60 g, pour le cas d'un tuyau galvanisé.

### IV.5.3 Tube en Polychlorure de vinyle (PVC)

La Figure IV.14 représente l'évolution de la charge de saturation  $Q_s$  en fonction de la quantité massique, variant de 5 g à 60 g pour le cas d'un tube en PVC. Les résultats de la Figure IV.14 indiquent qu'avec l'augmentation de la quantité de particules, la charge de saturation est réduite. La charge de saturation diminue d'environ - 6 nC/g à environ - 1,8 nC/g lorsque la quantité de particules est augmentée de 5 g à 60 g, ce qui représente une diminution d'approximativement 70 %.

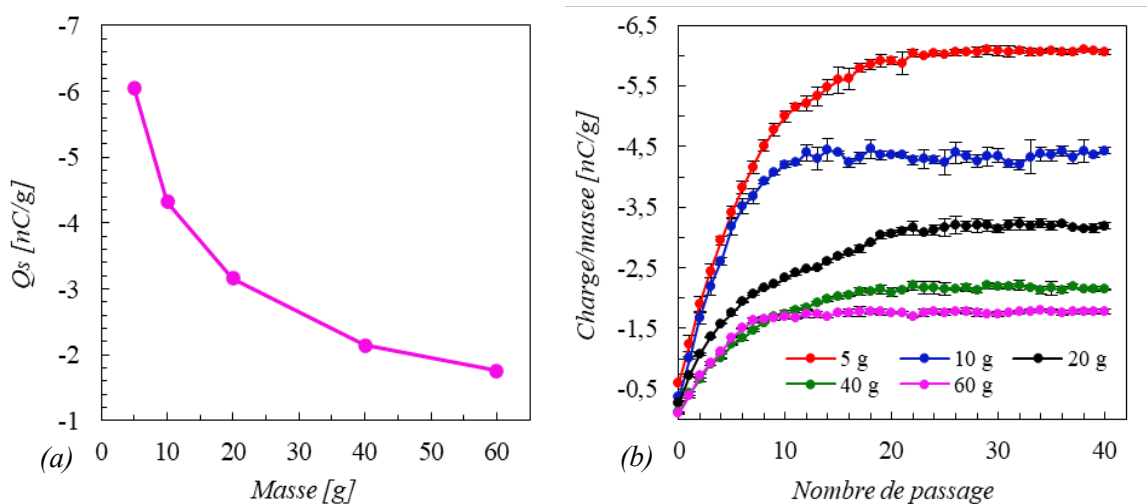
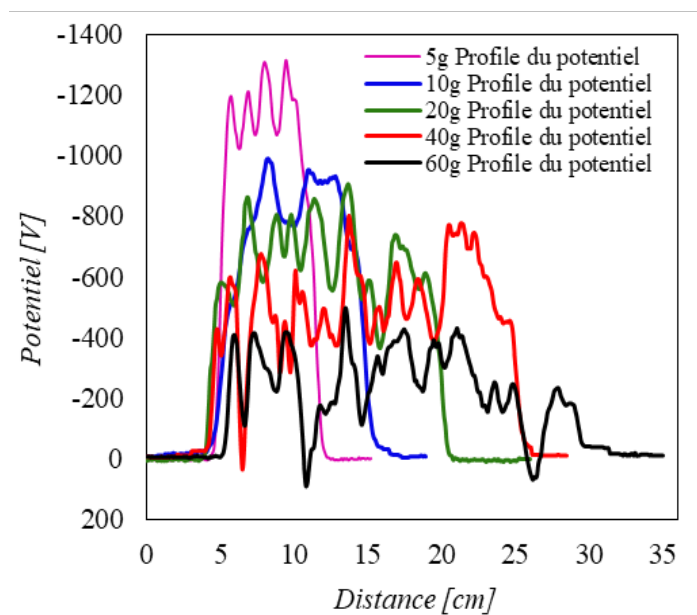


Figure IV.14 : Résultats expérimentaux représentant l'impact de l'élévation de la quantité massique sur la charge de saturation dans le cas d'un tube en PVC : (a) Charge de saturation en fonction de la quantité massique allant de 5 g à 60 g ; et (b) Charge massique en fonction du nombre de passages.

Les courbes de la **Figure IV.15** illustrent la distribution du potentiel de surface enregistrée à la surface des échantillons allant de 5 g à 60 g, dans le cas d'un tuyau en PVC. Les résultats de la **Figure IV.15** montrent que le potentiel de surface maximum enregistré d'un échantillon de 5 g est d'environ -1300 V, tandis que le potentiel maximum enregistré pour un échantillon de 20 g est d'environ -900 V, alors que seulement -500 V est enregistré pour un échantillon de 60 g. Les résultats indiquent des observations similaires pour le tube en PVC par rapport au tuyau galvanisé. Ces observations sont expliquées en détail dans le **paragraphe IV.5.2.2**.



*Figure IV.15 : Répartition du potentiel de surface à la surface des échantillons allant de 5 g à 60 g, pour le cas d'un tuyau en PVC.*

Lors d'une comparaison des résultats de l'influence de la quantité massique sur la charge de saturation des particules de polypropylène (PP) pour les trois types de tuyaux utilisés (tube en cuivre, tube galvanisé et tube en PVC), nous avons conclu qu'une augmentation de la quantité massique entraîne une diminution du niveau de charge de saturation, quel que soit le matériau du tube.

## **IV.6 Influence de l'angle d'inclinaison du tuyau sur la charge de saturation des particules de Polypropylène**

Le **Tableau IV.1** présente les paramètres et les conditions expérimentales utilisés dans l'étude qui concernent l'influence de l'angle d'inclinaison du tuyau sur la charge de saturation des particules.

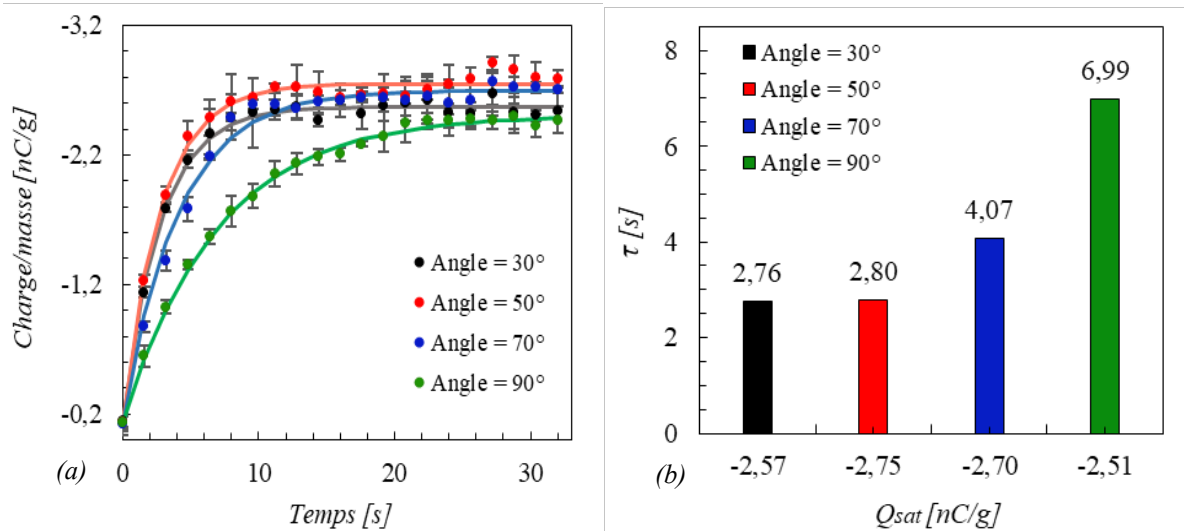
**Tableau IV.1 : Paramètres et conditions expérimentales utilisés dans l'étude de l'impact de l'angle d'inclinaison sur la charge de saturation.**

Type de tube	Dimensions de tube	Conditions atmosphériques	Angle d'inclinaison	Type de particules
Tube métallique en cuivre	1 m de longueur 4 cm de diamètre	RH = [55-64%] T = [22-24°C]	30°, 50°, 70°, 90°	Polypropylène (PP)

La **Figure IV.16** représente les résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide d'un modèle d'ajustement [19]. La **Figure IV.16** illustre l'impact de l'angle d'inclinaison d'un tube de cuivre incliné de 1 m de long sur la charge de saturation de 30 g de particules de polypropylène (PP) passées à plusieurs reprises à travers le tube de cuivre, ainsi que la constante de temps correspondante  $\tau$  en fonction de la charge de saturation  $Q_{sat}$ , pour le tuyau en cuivre d'une longueur de 1 m. Grâce à la **Figure IV.16 (a)** nous voyons que les particules de PP acquièrent une charge négative lorsqu'elles traversent le tube de cuivre. On remarque sur la **Figure IV.16 (a)** que plus l'angle d'inclinaison du tuyau est grand, plus le temps nécessaire aux particules pour atteindre la saturation est grand. A l'exception des angles 30° et 50°, on constate que le temps mis pour atteindre la saturation est très proche entre eux. Cependant, changer l'angle ne change pas le niveau de saturation des particules, car sous tous les angles, les particules sont saturées au même niveau aux alentours de (-2,6 nC/g). D'après la **Figure IV.16 (b)**, on remarque que plus l'angle d'inclinaison du tube est grand, plus la constante de temps  $\tau$  est grande, sauf pour les angles 30° et 50°, la constante de temps est très proche.

L'augmentation du temps nécessaire aux particules pour atteindre la charge de saturation lorsque l'angle d'inclinaison du tube augmente est due à la diminution du temps de passage des particules à l'intérieur du tube, et à la réduction de la surface de contact entre les particules et la paroi interne du tube quand l'angle d'inclinaison est accru. Ainsi, la réduction du temps de séjour des particules à l'intérieur du tube et la diminution de la surface de contact et de la durée de contact des particules avec la surface interne du tube se traduisent par l'acquisition de moins de charges après chaque passage à travers le tuyau. Par conséquent, plus l'angle d'inclinaison du

tube est grand, plus les particules prennent de temps pour que la charge de saturation soit atteinte.



**Figure IV.16 :** Résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'impact de l'angle d'inclinaison du tuyau sur la charge de saturation de particules de polypropylène de 30 g de poids soumises à des passages répétés à travers un tube de cuivre de 1 m [RH = 55-64 % et  $T = 22-24$  °C] ; et (b) Représentant la constante de temps  $\tau$  en fonction de  $Q_{sat}$  dans le cas d'un tuyau de cuivre d'une longueur de 1 m.

## IV.7 Influence du type de particules sur la charge de saturation des granules

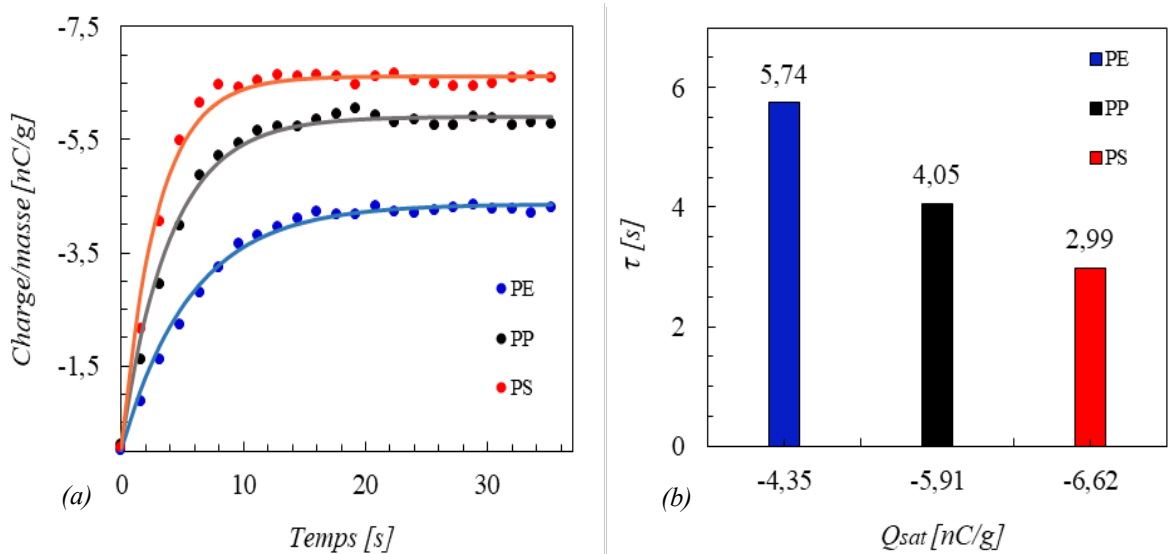
### IV.7.1 Tube galvanisé

Le **Tableau IV.2** expose les conditions expérimentales ainsi que les paramètres utilisés pour étudier l'impact du type de particules sur la charge de saturation des particules dans le cas d'un tube galvanisé.

**Tableau IV.2 :** Les conditions expérimentales et les paramètres de l'étude de l'influence du type de particules sur la charge de saturation (le cas d'un tuyau galvanisé).

Type de tube	Dimensions de tube	Conditions atmosphériques	Angle d'inclinaison	Type de particules
Tube métallique galvanisé	1 m de longueur 8 cm de diamètre	RH = 44% T = 22°C	21°	Polypropylène (PP) Polyéthylène (PE) Polystyrène (PS)

La **Figure IV.17** présente les résultats expérimentaux ainsi que les résultats d'ajustement illustrant l'impact du type de particules sur la charge de saturation de 30 g de particules de polypropylène, polyéthylène et de polystyrène ayant été soumises à des passages répétés à travers un tuyau galvanisé de 1 m de long, et la constante de temps correspondante  $\tau$  en fonction de la charge de saturation  $Q_{sat}$  pour le cas d'un tube galvanisé de 1 m. On voit à travers la **Figure IV.17 (a)** que les particules de PP, PE et PS se chargent négativement lorsqu'elles traversent le tube galvanisé. Les résultats de la **Figure IV.17 (a)** indiquent que le changement du type de particules entraîne un changement du niveau de charge de saturation, ce qui signifie que les particules de PP, PE et PS ne saturent pas au même niveau de saturation. Où, on peut observer que les particules de PS présentent le niveau de charge de saturation le plus important (à environ - 6,62 nC/g) par rapport au PP et au PE. Tandis que les particules de PP saturent à environ - 5,91 nC/g. Alors que les particules de PE saturent à environ - 4,35 nC/g. D'après la **Figure IV.17 (b)**, il est observé que l'accroissement du niveau de charge de saturation s'accompagne d'une réduction de la constante de temps, cela signifie que le temps nécessaire aux particules pour atteindre la saturation diminue.



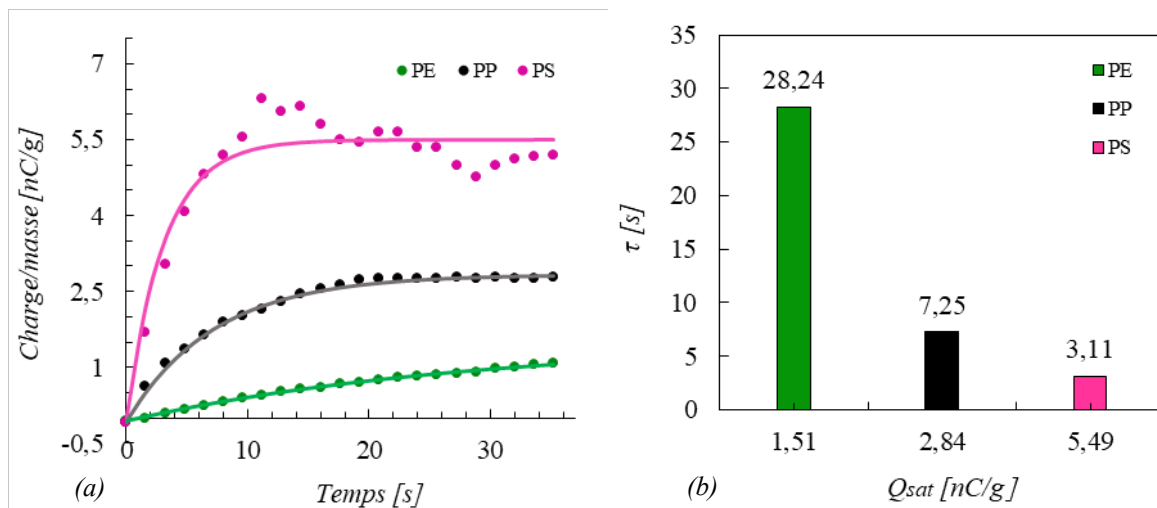
**Figure IV.17** : Résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'influence du type de particules sur la charge de saturation de 30 g de particules de polypropylène (PP), de polyéthylène (PE) et de polystyrène (PS) passées à plusieurs fois dans un tube galvanisé de 1 m [RH = 44 %, T = 22° C] ; et (b) Montrant la constante de temps  $\tau$  en fonction de  $Q_{sat}$  pour le cas d'un tube galvanisé de 1 m.

## IV.7.2 Tube en PVC

Le **Tableau IV.3** présente les paramètres ainsi que les conditions expérimentales utilisés pour étudier l'influence du type de particules sur la charge de saturation des particules dans le cas d'un tube en PVC.

**Tableau IV.3 :** Les paramètres et les conditions expérimentales utilisés dans l'étude de l'effet du type de particules sur la charge de saturation (le cas d'un tube de PVC).

Type de tube	Dimensions de tube	Conditions atmosphériques	Angle d'inclinaison	Type de particules
Tuyau (plastique) en Polychlorure de vinyle (PVC)	1 m de longueur 4 cm de diamètre	RH = 39,4% T = 23,3°C	21°	Polypropylène (PP) Polyéthylène (PE) Polystyrène (PS)



**Figure IV.18 :** Les résultats expérimentaux et d'ajustement à l'aide du modèle d'ajustement : (a) Montrant l'effet du type de particules sur la charge de saturation d'un 30 g de particules de PP, PE et PS passées à plusieurs fois dans un tube en PVC de 1 m [RH = 39,4 %, T = 23,3°C] ; et (b) Montrant la constante de temps  $\tau$  en fonction de  $Q_{sat}$  pour le cas d'un tube en PVC de 1 m.

La **Figure IV.18** montre les résultats expérimentaux ainsi que les résultats d'ajustement illustrant l'impact du type de particules sur la charge de saturation d'une masse de 30 g de particules de polypropylène, polyéthylène et polystyrène, après les avoir passées à plusieurs reprises dans un tube de PVC d'une longueur de 1 m. Également, la constante de temps correspondante  $\tau$  en fonction de la charge de saturation  $Q_{sat}$  pour le cas d'un tuyau en PVC de 1 m de long est représentée dans la **Figure IV.18**. Lors de leur passage à travers le tube en PVC,

les particules de PP, PS et PE acquièrent une charge positive, comme le montre la **Figure IV.18 (a)**. De plus, les résultats illustrés dans la **Figure IV.18 (a)** démontrent que le changement du type de particules entraîne une variation du niveau de charge de saturation. Il est toujours observé que les particules de PS présentent le plus haut niveau de charge de saturation, atteignant environ 5,49 nC/g. Les particules de PP saturent à environ 2,84 nC/g. Alors que les particules de PE saturent à environ 1,51 nC/g. Les résultats illustrés dans la **Figure IV.18 (b)** indiquent que la constante de temps décroît à mesure que le niveau de charge de saturation augmente, c'est-à-dire que le temps nécessaire aux particules pour atteindre la saturation diminue.

L'existence d'une différence entre les niveaux de charge de saturation des particules de PS, PP et PE, ainsi que la réduction de la constante de temps  $\tau$  avec l'accroissement du niveau de charge de saturation (qu'il s'agisse dans le cas de tube galvanisé ou de tube en PVC), s'explique par les distinctions en termes de composition chimique, de propriétés et de capacité d'acquisition de charge de chaque type de particule.

En se basant sur les résultats présentés dans la **Figure IV.17** et la **Figure IV.18**, il est possible de conclure que l'utilisation de deux types de matériaux de tuyaux différents, à savoir le PVC et le galvanisé, n'a pas d'incidence sur l'ordre des niveaux de charge de saturation des particules de PS, PP et PE. En effet, il est observé que l'ordre des niveaux de charge de saturation des particules est similaire pour les deux types de tuyaux, se manifestant dans un ordre décroissant, débutant par PS, suivi de PP, puis de PE. Il est observé que la seule différence entre les résultats des deux tuyaux réside dans la polarité de la charge des particules, ces dernières étant chargées positivement avec le tuyau en PVC et négativement avec le tuyau métallique galvanisé. Cette inversion de polarité de la charge des particules observée entre les deux types de tuyaux est attribuable aux variations de composition chimique et aux propriétés distinctes de chaque tube.

## Conclusions

L'impact de la charge initiale, de la quantité massique, de l'angle d'inclinaison du tube et du type de particules sur la charge de saturation d'un groupe de particules de taille millimétrique a été étudié. Les résultats principaux de cette étude sont résumés comme suit :

- Les particules de polypropylène (PP) sont chargées négativement lorsqu'elles passent à travers le tuyau en cuivre. Les particules de polypropylène (PP), polyéthylène (PE) et polystyrène (PS) se chargent négativement lorsqu'elles passent à l'intérieur du tube galvanisé et se chargent positivement lorsqu'elles traversent le tube en PVC.
- L'accumulation de charge sur les particules traversant un tube est fortement influencée par leur valeur de charge initiale et leur polarité.
- La variation de la tribocharge au fil du temps est contrôlée à travers le rapport entre la charge initiale des particules et leur charge de saturation. Une charge initiale supérieure à la charge de saturation provoque une diminution de la charge des particules jusqu'à ce qu'elles atteignent leur charge de saturation. Au contraire, une charge initiale inférieure à la charge de saturation provoque une hausse de la charge des particules jusqu'à ce qu'elles atteignent leur charge de saturation. Le rythme auquel les particules se chargent ou se déchargent dépend de leur charge initiale qu'elles portent. Le processus est plus rapide au moment où la charge initiale est plus élevée que la charge de saturation, ce qui caractérise le régime de décharge.
- L'accroissement de la quantité massique conduit à une baisse du niveau de charge de saturation. Au moment où la quantité des particules croît, on constate une disparité dans leur charge. Une variation notable du signe des zones chargées est également enregistrée lorsque la quantité augmente.
- Plus l'angle d'inclinaison du tuyau est grand, plus le temps nécessaire aux particules pour atteindre la saturation est long. Cela signifie que l'augmentation de l'angle d'inclinaison du tube entraîne une augmentation de la constante de temps  $\tau$ .
- Que ce soit dans le cas d'un tube galvanisé ou en PVC, lorsqu'on change le type de particules, on observe également un changement du niveau de charge de saturation de ces particules. Ceci implique que chaque type de particule possède son propre niveau de charge de saturation.

# **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

# Conclusion générale

---

L'électricité statique constitue un phénomène d'une extrême complexité, et sa compréhension reste encore partielle. Parfois, l'électricité statique est considérée comme un phénomène indésirable, particulièrement dans les milieux industriels. Ce phénomène apparaît lors du chargement triboélectrique des matériaux polymères isolants. Le chargement triboélectrique est un phénomène physique bien connu qui se produit lorsqu'il y a un contact ou un frottement entre deux matériaux isolants, ou entre un isolant et un conducteur. Ce phénomène se caractérise par des échanges d'électrons entre les surfaces en contact, ce qui entraîne un transfert de charges électriques d'une surface à l'autre et donc la génération d'une différence de potentiel électrique sur les deux surfaces. Ce phénomène est soumis à l'influence de nombreux facteurs. Le tribochargement revêt une importance considérable dans de nombreuses applications et présente également une multitude d'utilisations, notamment dans les secteurs industriels. À cet égard, on peut citer : la précipitation électrostatique, l'électrophotographie, la pulvérisation électrostatique dans le domaine de la peinture, ainsi que la séparation électrostatique, entre autres.

Généralement, la thèse a apporté de multiples contributions dans ce domaine :

- Réalisation d'une installation expérimentale comprenant principalement un tube incliné qui vise à éviter l'utilisation d'air en écoulement et à garantir un maximum de contact entre les particules et la paroi interne du tube.
- Modélisation du tribochargement en utilisant deux méthodes de prédiction différentes : la méthode de "Monte Carlo" et la méthode de "Machine Learning", lesquelles sont capables de prédire la tribocharge.
- Réalisation d'une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits obtenus.
- Réalisation d'un profil de distribution du potentiel de surface des matériaux granulaires pour approfondir la compréhension du phénomène du chargement triboélectrique.
- Répétition de chaque expérience au moins trois fois afin d'évaluer la reproductibilité des mêmes mesures à d'autres moments.

- Etude expérimentale de l'effet de la longueur et de la température du tube galvanisé sur la charge triboélectrique des particules de polypropylène (PP).
- Etude de l'influence des conditions ambiantes sur la charge des particules.
- Etude de l'influence de la charge initiale, de la quantité massique des particules, de l'angle d'inclinaison du tuyau ainsi que du type de particules sur la charge de saturation d'un ensemble de particules de taille millimétrique.

La conclusion générale de nos travaux peut être formulée de la manière suivante : le phénomène de chargement triboélectrique est influencé par divers facteurs, notamment : la longueur et la température des conduits (canalisations) de transport des particules, les conditions ambiantes telles que l'humidité relative et la température ambiante, la quantité massique, l'angle d'inclinaison du tube, le type et la nature des particules, en plus de la charge initiale des particules... etc. Le contrôle de la charge électrique résultant du tribocharge est obtenu en contrôlant et en surveillant ces facteurs, en particulier dans les milieux industriels où les risques liés au tribocharge peuvent avoir des conséquences considérables. Le contrôle et la surveillance des facteurs d'influence permettent de réduire les problèmes liés à ce phénomène, où ces problèmes peuvent avoir un impact non seulement sur la production et le bon fonctionnement des machines, mais aussi sur les travailleurs (pertes humaines), et en sus des incendies susceptibles de se déclarer dans les milieux industriels.

De cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'accroissement de la longueur du tube conduit à une augmentation de la charge triboélectrique des particules.
- Au fur et à mesure que la température du tuyau galvanisé augmente, la charge triboélectrique accumulée par les particules de polypropylène diminue graduellement.
- Même si les particules présentent une taille presque pareille et se trouvent dans des conditions semblables, leur niveau de charge de saturation peut différer selon la nature du matériau de particule ainsi que de son type.
- Les résultats de la prédiction de la charge triboélectrique des particules obtenus à l'aide du modèle d'estimation de "Monte Carlo" et du modèle de prédiction par "Machine-learning" s'avèrent prometteurs et prouvent la possibilité de prédire la tribocharge, où les résultats prédits étant très proches, voire presque identiques, aux résultats expérimentaux.
- Les conditions ambiantes ont eu un effet sur la charge des particules (PP, PS et PE), que nous utilisons le tuyau galvanisé ou bien le tube en PVC.

- La valeur de la charge initiale et la polarité de la charge des particules ont un effet sur la charge de saturation des particules qui passent à travers un tube.
- L'augmentation de la quantité massique entraîne une diminution du niveau de charge de saturation des particules.
- L'accroissement de l'angle d'inclinaison du tuyau conduit à une élévation de la constante de temps  $\tau$ . Cela implique que, lorsque l'on augmente l'angle d'inclinaison du tube, les particules mettent plus de temps à atteindre la charge de saturation.
- Chaque type de particule présente un niveau de charge de saturation qui lui est propre. Ce qui signifie que le changement du type de particules entraîne un changement du niveau de charge de saturation, lequel diffère selon le type de particules.

# Perspectives

---

Les recherches effectuées dans le cadre de cette thèse offrent des perspectives prometteuses, permettant ainsi une compréhension approfondie et une maîtrise accrue du comportement triboélectrique des matériaux isolants. Les recommandations pour les recherches et travaux futurs qui découleront de cette thèse pourraient se concentrer sur les aspects suivants:

1. Étendre notre travail à d'autres types de matériaux, qu'il s'agisse du matériau des tubes ou du matériau des particules. Cela permettra de généraliser les conclusions concernant le phénomène de chargement triboélectrique.
2. Étude de l'effet d'autres facteurs, qu'ils soient internes ou externes, sur le comportement de la charge triboélectrique.
3. Étudiez les solutions aux problématiques d'électricité statique et du phénomène de tribochargement, en particulier les problèmes qui surviennent dans les milieux industriels.
4. Développer d'autres modèles pour prédire la charge triboélectrique.
5. Réaliser une étude comparative de la charge triboélectrique en utilisant un tuyau en PVC et un tuyau galvanisé ayant les mêmes dimensions.
6. Amélioration des installations de laboratoire :
  - Assurer le contrôle des conditions ambiantes au sein de la salle d'expérimentation afin d'améliorer la qualité des résultats.
  - Développer un dispositif de chargement triboélectrique permettant de mesurer la charge à des emplacements et des longueurs spécifiques sans éjecter les particules à l'extérieur du tube.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

# Références Bibliographiques

---

- [1] F. Freschi, M. Mitolo, and R. Tommasini, “Analysis of Causation of a Flour Dust Explosion in an Industrial Plant,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 6, pp. 5182–5186, Nov. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2725947.
- [2] W. Moroń and W. Ferens, “Analysis of fire and explosion hazards caused by industrial dusts with a high content of volatile matter,” *Fuel*, vol. 355, p. 129363, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129363.
- [3] H. Cui and J. R. Grace, “Pneumatic conveying of biomass particles: a review,” *China Particuology*, vol. 4, no. 3, pp. 183–188, Jul. 2006, doi: 10.1016/S1672-2515(07)60259-0.
- [4] Y. Ji, S. Liu, and J. Li, “Experimental and numerical studies on dense-phase pneumatic conveying of spraying material in venturi,” *Powder Technology*, vol. 339, pp. 419–433, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.08.031.
- [5] E. W. C. Lim, Y. Zhang, and C.-H. Wang, “Effects of an electrostatic field in pneumatic conveying of granular materials through inclined and vertical pipes,” *Chemical Engineering Science*, vol. 61, no. 24, pp. 7889–7908, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.ces.2006.07.045.
- [6] E. W. C. Lim, J. Yao, and Y. Zhao, “Electrostatic effects in pneumatic transport of granular materials,” *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.*, vol. 19, pp. 351–361, Jan. 2012, doi: 10.1142/S201019451200894X.
- [7] “Transport par transport pneumatique,” Delft Solids Solutions. <https://www.solids-solutions.com/fr/rd/traitement-des-poudres-pour-le-developpement-des-materiaux/transport-par-transport-pneumatique/>
- [8] A. Copco, “Les principes de base du transport pneumatique - Atlas Copco Algérie.” <https://www.atlascopco.com/fr-dz/compressors/industry-solutions/pneumatic-conveying-systems/basic-principles>
- [9] K. Saleh and A. Aghili, “The spatio-temporal evolution of tribo-electric charge transfer during the pneumatic conveying of powders: Modelling and experimental validation,” *Chemical Engineering Science*, vol. 68, no. 1, pp. 120–131, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.ces.2011.09.054.
- [10] K. Saleh, “Modelling of spatio-temporal evolution of electrostatic charge transfer during the pneumatic transport of powders: General solutions and special cases,” *Chemical Engineering Science*, vol. 102, pp. 163–175, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.ces.2013.07.036.
- [11] Y. Zhao, M. Liu, C.-H. Wang, S. Matsusaka, and J. Yao, “Electrostatics of granules and granular flows: A review,” *Advanced Powder Technology*, vol. 34, no. 1, p. 103895, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.appt.2022.103895.

- [12] M. Taghavivand, B. Elchamaa, A. Sowinski, and P. Mehrani, “Study of electrostatic charging of single particles during pneumatic conveying,” *Powder Technology*, vol. 355, pp. 242–250, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2019.07.046.
- [13] X. Chuanlong, T. Guanghai, and W. Shimin, “Charging of coal powder particles in dense phase pneumatic conveying system at low pressure,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 2, pp. 386–390, Apr. 2009, doi: 10.1109/TDEI.2009.4815168.
- [14] K. Saleh, A. Traoré, A. Aghili, and P. Guigon, “Modélisation des phénomènes triboélectriques lors du transport pneumatique des poudres,” *7<sup>th</sup> Conference of the French Society of Electrostatics SFE, Montpellier, France, 2010*. [https://www.researchgate.net/publication/280939215\\_Modelisation\\_des\\_phenomenes\\_triboelectriques\\_lors\\_du\\_transport\\_pneumatique\\_des\\_poudres](https://www.researchgate.net/publication/280939215_Modelisation_des_phenomenes_triboelectriques_lors_du_transport_pneumatique_des_poudres).
- [15] J. Yao, S. Cong, Y. Zhao, C.-H. Wang, and Z. Ji, “Investigation of granular surface roughness effect on electrostatic charge generation,” *Advanced Powder Technology*, vol. 28, no. 9, pp. 2003–2014, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.appt.2017.04.001.
- [16] J. Yao and C.-H. Wang, “Granular size and shape effect on electrostatics in pneumatic conveying systems,” *Chemical Engineering Science*, vol. 61, no. 12, pp. 3858–3874, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.ces.2006.01.015.
- [17] J. Yao *et al.*, “Experimental investigations of granular shape effects on the generation of electrostatic charge,” *Particuology*, vol. 15, pp. 82–89, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.partic.2013.01.010.
- [18] J. Wu, J. Yao, and Y. Zhao, “The effects of granular velocity and shape factors on the generation of polymer-metal electrostatic charge,” *Journal of Electrostatics*, vol. 82, pp. 22–28, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.elstat.2016.05.001.
- [19] S. Mouhoub, M. Kachi, and N. Zouzou, “Influence of the initial charge on the triboelectrification of millimeter size set of particles in an inclined tube,” *Powder Technology*, vol. 428, p. 118862, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2023.118862.
- [20] Y. Zhao, J. Fang, Y. Wang, Y. Shen, J. Yao, and C.-H. Wang, “Experimental investigation of surface roughness effect on electrostatics generation,” *Powder Technology*, vol. 357, pp. 33–45, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2019.08.104.
- [21] K. Saleh, A. Traore Ndama, and P. Guigon, “Relevant parameters involved in tribocharging of powders during dilute phase pneumatic transport,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, no. 12, pp. 2582–2597, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.cherd.2011.06.001.
- [22] U. Lesprit, T. Paillat, N. Zouzou, A. Paquier, and M. Yonger, “Triboelectric charging of a glass bead impacting against polymers: Antistatic effects in glass/PU electrification in a humidity-controlled environment,” *Journal of Electrostatics*, vol. 113, p. 103605, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.elstat.2021.103605.

- [23] R. Myna, Wimmer, Rupert, Liebner, Falk, Leiter, Lena, and S. and Frömel-Frybort, “Triboelectric charging of dust particles during hand-held circular sawing of wood and wood-based materials,” *Wood Material Science & Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 64–73, Jan. 2021, doi: 10.1080/17480272.2020.1830850.
- [24] C. Dragan, M. Bilici, S. Das, A. Samuila, and L. Dascalescu, “Tribocharging of Insulating Powders in the Annular Ducts of Pneumatic Devices,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 3, pp. 1138–1143, May 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2045095.
- [25] S. Matsusaka, H. Maruyama, T. Matsuyama, and M. Ghadiri, “Triboelectric charging of powders: A review,” *Chemical Engineering Science*, vol. 65, no. 22, pp. 5781–5807, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.ces.2010.07.005.
- [26] K. Bouzid, “Comportement à l’usure et à la corrosion dans différents milieux, de systèmes ternaires des nitrures élaborés par pulvérisation cathodiques dual Magnétron,” Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015. <https://dspace.univ-annaba.dz/handle/123456789/2882>
- [27] F. P. Bowden and D. Tabor, “Friction, lubrication and wear: a survey of work during the last decade,” *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 17, no. 12, p. 1521, Dec. 1966, doi: 10.1088/0508-3443/17/12/301.
- [28] L. M. Dumitran, P. Atten, D. Blanchard, and P. Notingher, “Drift velocity of fine particles estimated from fractional efficiency measurements in a laboratory-scaled electrostatic precipitator,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 3, pp. 852–857, May 2002, doi: 10.1109/TIA.2002.1003440.
- [29] L. P. Hammett and A. J. Deyrup, “A series of simple basic indicators. i. the acidity functions of mixtures of sulfuric and perchloric acids with water<sup>1</sup>,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 54, no. 7, pp. 2721–2739, Jul. 1932, doi: 10.1021/ja01346a015.
- [30] L. Liu, A. M. Seyam, and W. Oxenham, “Frictional Electrification on Polymeric Flat Surfaces,” *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 8, no. 1, p. 155892501300800115, Mar. 2013, doi: 10.1177/155892501300800115.
- [31] A. Benabderrahmane, “Contribution à l’analyse des facteurs influents du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires,” Thèse de Doctorat, Université de Poitiers ; Université Djillali Liabès (Sidi Bel-Abbès, Algérie), 2021. <https://theses.hal.science/tel-03291984>
- [32] D. E. Fekir, “Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille,” Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabès (Sidi Bel-Abbès, Algérie), 2017. <https://dspace.univ-sba.dz/handle/123456789/1245>
- [33] W. D. Greason, “Investigation of a test methodology for triboelectrification,” in *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings. 1999*, Sep. 1999, pp. 344–351. doi: 10.1109/EOSESD.1999.819082.

- [34] W. J. Brennan, J. Lowell, M. C. O'Neill, and M. P. W. Wilson, "Contact electrification: the charge penetration depth," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 25, no. 10, p. 1513, Oct. 1992, doi: 10.1088/0022-3727/25/10/018.
- [35] D. K. Davies, "Charge generation on dielectric surfaces," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 2, no. 11, p. 1533, Nov. 1969, doi: 10.1088/0022-3727/2/11/307.
- [36] A. G. Bailey, "The charging of insulator surfaces," *Journal of Electrostatics*, vol. 51–52, pp. 82–90, May 2001, doi: 10.1016/S0304-3886(01)00106-1.
- [37] J. Lowell and A. C. and Rose-Innes, "Contact electrification," *Advances in Physics*, vol. 29, no. 6, pp. 947–1023, Dec. 1980, doi: 10.1080/00018738000101466.
- [38] L. S. McCarty and G. M. Whitesides, "Electrostatic Charging Due to Separation of Ions at Interfaces: Contact Electrification of Ionic Electrets," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, no. 12, pp. 2188–2207, Mar. 2008, doi: 10.1002/anie.200701812.
- [39] C. Liu and A. J. Bard, "Electrons on dielectrics and contact electrification," *Chemical Physics Letters*, vol. 480, no. 4, pp. 145–156, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.cplett.2009.08.045.
- [40] D. K. Davies, "The examination of the electrical properties of insulators by surface charge measurement," *J. Sci. Instrum.*, vol. 44, no. 7, p. 521, Jul. 1967, doi: 10.1088/0950-7671/44/7/308.
- [41] J. Fuhrmann, "Contact electrification of dielectric solids," *Journal of Electrostatics*, vol. 4, no. 2, pp. 109–118, Jan. 1978, doi: 10.1016/0304-3886(78)90067-0.
- [42] J. Fuhrmann, R. Lamour, and G. Rehage, "Gleichstromleitfähigkeit und Polarisationsströme des Polystyrols," in *Mehrphasige Polymersysteme*, E. W. Fischer, F. Horst Müller, and H. H. Kausch, Eds., Darmstadt: Steinkopff, 1977, pp. 131–140. doi: 10.1007/BFb0117104.
- [43] A. R. Akande and J. Lowell, "Charge transfer in metal/polymer contacts," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 20, no. 5, p. 565, May 1987, doi: 10.1088/0022-3727/20/5/002.
- [44] A. F. Diaz and J. Guay, "Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 37, no. 2, pp. 249–260, Mar. 1993, doi: 10.1147/rd.372.0249.
- [45] A. F. Diaz, "Contact Electrification of Materials: The Chemistry of Ions on Polymer Surfaces," *The Journal of Adhesion*, vol. 67, no. 1–4, pp. 111–122, May 1998, doi: 10.1080/00218469808011102.
- [46] G. Zhu *et al.*, "Linear-Grating Triboelectric Generator Based on Sliding Electrification," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 2282–2289, May 2013, doi: 10.1021/nl4008985.
- [47] D. A. Seanor, "Triboelectrification of Polymers — A Chemist's Viewpoint," in *Physicochemical Aspects of Polymer Surfaces: Volume 1*, K. L. Mittal, Ed., Boston, MA: Springer US, 1983, pp. 477–506. doi: 10.1007/978-1-4615-7584-9\_28.

- [48] F. Galembeck, T. A. L. Burgo, L. B. S. Balestrin, R. F. Gouveia, C. A. Silva, and A. Galembeck, “Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives,” *RSC Adv.*, vol. 4, no. 109, pp. 64280–64298, Nov. 2014, doi: 10.1039/C4RA09604E.
- [49] L. S. McCarty, A. Winkleman, and G. M. Whitesides, “Ionic Electrets: Electrostatic Charging of Surfaces by Transferring Mobile Ions upon Contact,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 129, no. 13, pp. 4075–4088, Apr. 2007, doi: 10.1021/ja067301e.
- [50] A. Nadjem, “Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques,” Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/6136>
- [51] J. Lowell, “Surface states and the contact electrification of polymers,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 10, no. 1, p. 65, Jan. 1977, doi: 10.1088/0022-3727/10/1/008.
- [52] J. Lowell, “The electrification of polymers by metals,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 9, no. 11, p. 1571, Aug. 1976, doi: 10.1088/0022-3727/9/11/006.
- [53] J. A. Wiles, M. Fialkowski, M. R. Radowski, G. M. Whitesides, and B. A. Grzybowski, “Effects of Surface Modification and Moisture on the Rates of Charge Transfer between Metals and Organic Materials,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 108, no. 52, pp. 20296–20302, Dec. 2004, doi: 10.1021/jp0457904.
- [54] J. Lowell, “Constraints on contact charging of insulators. I. Spatial localisation of insulator states,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 19, no. 1, p. 95, Jan. 1986, doi: 10.1088/0022-3727/19/1/014.
- [55] A. F. Diaz, D. Wollmann, and D. Dreblow, “Contact electrification: ion transfer to metals and polymers,” *Chem. Mater.*, vol. 3, no. 6, pp. 997–999, Nov. 1991, doi: 10.1021/cm00018a006.
- [56] B. A. Grzybowski, J. A. Wiles, and G. M. Whitesides, “Dynamic Self-Assembly of Rings of Charged Metallic Spheres,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, no. 8, p. 083903, Feb. 2003, doi: 10.1103/PhysRevLett.90.083903.
- [57] J. A. Wiles, B. A. Grzybowski, A. Winkleman, and G. M. Whitesides, “A Tool for Studying Contact Electrification in Systems Comprising Metals and Insulating Polymers,” *Anal. Chem.*, vol. 75, no. 18, pp. 4859–4867, Sep. 2003, doi: 10.1021/ac034275j.
- [58] A. Diaz, D. Fenzel-Alexander, D. Wollmann, and J. A. Barker, “Importance of dissociated ions in contact charging,” *Langmuir*, vol. 8, no. 11, pp. 2698–2706, Nov. 1992, doi: 10.1021/la00047a020.
- [59] S. W. Thomas, S. J. Vella, G. K. Kaufman, and G. M. Whitesides, “Patterns of Electrostatic Charge and Discharge in Contact Electrification”, doi: 10.1002/anie.200802062.
- [60] M. D. Hogue, C. R. Buhler, C. I. Calle, T. Matsuyama, W. Luo, and E. E. Groop, “Insulator–insulator contact charging and its relationship to atmospheric pressure,” *Journal of Electrostatics*, vol. 61, no. 3, pp. 259–268, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.elstat.2004.03.002.

- [61] R. K. Pandey, H. Kakehashi, H. Nakanishi, and S. Soh, “Correlating Material Transfer and Charge Transfer in Contact Electrification,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 122, no. 28, pp. 16154–16160, Jul. 2018, doi: 10.1021/acs.jpcc.8b04357.
- [62] H. T. Baytekin, B. Baytekin, J. T. Incorvati, and B. A. Grzybowski, “Material Transfer and Polarity Reversal in Contact Charging”, doi: 10.1002/ange.201200057.
- [63] P. E. Shaw, “Experiments on Tribo-Electricity. I. The Tribo-Electric Series,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 94, no. 656, pp. 16–33, 1917.
- [64] G. Sutra, “La triboélectricité,” *Journal de Physique et le Radium*, vol. 11, no. 8–9, p. S1, 1950, doi: 10.1051/jphysrad:01950001108-903300.
- [65] “The TriboElectric Effect Series,” AlphaLab, Inc. <https://www.alphalabinc.com/triboelectric-series/>
- [66] A. Mekhalef Benhafssa, “Etude d’un séparateur tribo-aéro électrostatique des mélanges des matériaux poudreux,” Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabès (Sidi Bel-Abbès, Algérie), 2017.
- [67] S. Messal, “Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l’industrie agro-alimentaire,” These de doctorat, Université de Poitiers, 2016. <https://theses.fr/2016POIT2304>
- [68] M.-B. Neagoe, “Modélisation expérimentale de phénomènes électrostatiques et tribologiques aux interfaces solide/solide,” These de doctorat, Université de Poitiers, 2017. <https://theses.hal.science/tel-02064651>
- [69] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, “Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 5, pp. 1476–1483, Oct. 2011, doi: 10.1109/TDEI.2011.6032818.
- [70] B. M. Rodrigues and C. Saron, “Electrostatic separation of polymer waste by tribocharging system based on friction with PVC,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 1293–1300, Mar. 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03229-x.
- [71] H. Zhang, X. Gao, and S. Xu, “Tribo-charging and electrostatic separation of vehicle polymer particles using a new type of fluidized bed,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 178, pp. 331–341, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.08.038.
- [72] I.-E. Achouri, M.-F. Boukhoulda, K. Medles, G. Richard, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, “Electrostatic Separation of Tribocharged Granular Mixtures of Two or More Plastics Originating From WEEE,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 6, pp. 7701–7708, Nov. 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3197544.
- [73] J. P. Vaquero, J. Landauer, and P. Foerst, “Tribo-electrostatic separation of binary mixtures from polymeric and food materials,” *Journal of Electrostatics*, vol. 121, p. 103772, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.elstat.2022.103772.

- [74] S. N. Alam *et al.*, “An introduction to triboelectric nanogenerators,” *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 34, p. 100980, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.nanoso.2023.100980.
- [75] F.-R. Fan, Z.-Q. Tian, and Z. L. Wang, “Flexible triboelectric generator,” *Nano Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 328–334, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.nanoen.2012.01.004.
- [76] Y. Yang, L. Lin, Y. Zhang, Q. Jing, T.-C. Hou, and Z. L. Wang, “Self-Powered Magnetic Sensor Based on a Triboelectric Nanogenerator,” *ACS Nano*, vol. 6, no. 11, pp. 10378–10383, Nov. 2012, doi: 10.1021/nn304374m.
- [77] Z. L. Wang, “Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors,” *ACS Nano*, vol. 7, no. 11, pp. 9533–9557, Nov. 2013, doi: 10.1021/nn404614z.
- [78] “Nanogenerator,” *Wikipedia*.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nanogenerator&oldid=1291643733#cite\\_note-42](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nanogenerator&oldid=1291643733#cite_note-42)
- [79] G. Dodbiba, J. Sadaki, K. Okaya, A. Shibayama, and T. Fujita, “The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics,” *Minerals Engineering*, vol. 18, no. 15, pp. 1350–1360, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.mineng.2005.02.015.
- [80] W. Askri, “Générateurs flexibles et hybrides tribo/piézo-électrique pour l’auto-alimentation de capteurs communicants,” These de doctorat, Université de Nantes, 2024.  
<https://theses.hal.science/tel-05017957>
- [81] M. Blajan, R. Belega, A. Iuga, and L. Dascalescu, “Triboelectrification of Granular Plastic Wastes in Vibrated Zigzag-Shaped Square Pipes in View of Electrostatic Separation,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1558–1563, Jul. 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2049552.
- [82] L. Calin *et al.*, “Tribocharging of Granular Plastic Mixtures in View of Electrostatic Separation,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 4, pp. 1045–1051, Jul. 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.926689.
- [83] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga, and L. Dascalescu, “Fluidized Bed Device for Plastic Granules Triboelectrification,” *Particulate Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 205–211, Apr. 2007, doi: 10.1080/02726350701257782.
- [84] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, “Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device,” *Journal of Electrostatics*, vol. 63, no. 6–10, pp. 937–942, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.elstat.2005.03.064.
- [85] M. E.-M. Zelmat, M. Rizouga, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi, and L. Dascalescu, “Experimental Comparative Study of Different Tribocharging Devices for Triboelectric Separation of Insulating Particles,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1113–1118, May 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2251991.
- [86] M. E. Zelmat, A. Tilmatine, M. Rizouga, R. Gouri, K. Medles, and L. Dascalescu, “Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free-fall triboelectric separation

of plastic particles,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 5, pp. 1584–1589, Oct. 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6633687.

[87] C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila, and L. Dascalescu, “Tribocharging of Mixed Granular Plastics in a Fluidized-Bed Device,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 4, pp. 1922–1928, Jul. 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2156374.

[88] L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, and A. Samuila, “Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices,” *Journal of Electrostatics*, vol. 63, no. 6–10, pp. 705–710, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.elstat.2005.03.042.

[89] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, and L. Dascalescu, “Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials,” *Journal of Electrostatics*, vol. 69, no. 6, pp. 631–637, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.elstat.2011.08.010.

[90] J. D. Brown, P. F. Wynen, and T. E. Doyle, “Tribocharging and electrostatic separation of mixed electrically insulating particles,” US6927354B1, Aug. 09, 2005 <https://patents.google.com/patent/US6927354B1/en>

[91] G. Wu, J. Li, and Z. Xu, “Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review,” *Waste Management*, vol. 33, no. 3, pp. 585–597, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.10.014.

[92] I. E. Achouri, T. Zeghloul, K. Medles, G. Richard, and L. Dascalescu, “Factors Influencing the Triboelectric Charging of Granular Plastics in a Rotating-cylinder-type Tribocharger,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 724, no. 1, p. 012048, Jan. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/724/1/012048.

[93] I. I. Inculet, G. S. P. Castle, and J. D. Brown, “Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics,” in *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Oct. 1994, pp. 1397–1399 vol.2. doi: 10.1109/IAS.1994.377605.

[94] S. Masuda, M. Toraguchi, T. Takahashi, and K. Haga, “Electrostatic Beneficiation of Coal Using a Cyclone-Tribocharger,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-19, no. 5, pp. 789–793, Sep. 1983, doi: 10.1109/TIA.1983.4504289.

[95] G. Dodbiba, J. Sadaki, K. Okaya, A. Shibayama, and T. Fujita, “The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics,” *Minerals Engineering*, vol. 18, no. 15, pp. 1350–1360, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.mineng.2005.02.015.

[96] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, and T. Fujita, “Electrostatic Separation of the Shredded Plastic Mixtures Using A Tribo-Cyclone,” *Physical Separation in Science and Engineering*, vol. 11, no. 1–2, pp. 63–92, 2002, doi: 10.1080/07313630290002626.

[97] M. Rezoug, R. Ouiddir, W. Aksa, K. Medles, M. Bilici, and L. Dascalescu, “Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Ternary Mixtures of Granular Plastics,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, pp. 1161–1167, Mar. 2015, doi: 10.1109/TIA.2014.2347451.

- [98] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S.-E. Bendimerad, M. Miloudi, and K. Medles, “Experimental Investigation of Electrostatic Separators of Plastic Particles using Different Charging Devices,” *Separation Science and Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 464–468, Feb. 2014, doi: 10.1080/01496395.2013.843008.
- [99] L. Dascalescu *et al.*, “Factors that influence the efficiency of a fluidized-bed-type tribo-electrostatic separator for mixed granular plastics,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 301, no. 1, p. 012066, Jun. 2011, doi: 10.1088/1742-6596/301/1/012066.
- [100] I. E. Achouri, “Chargement triboélectrique et séparation électrostatique des mélanges de matériaux plastiques granulaires provenant des déchets industriels,” Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2022. <https://theses.hal.science/tel-04016609>
- [101] S. L. Escalante, G. Touchard, and G. Dominguez, “Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes,” in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Oct. 2002, pp. 694–697. doi: 10.1109/CEIDP.2002.1048891.
- [102] J. C. Laurentie, P. Traoré, and L. Dascalescu, “Discrete element modeling of triboelectric charging of insulating materials in vibrated granular beds,” *Journal of Electrostatics*, vol. 71, no. 6, pp. 951–957, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.elstat.2013.08.001.
- [103] J. Li, G. Wu, and Z. Xu, “Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation,” *Waste Management*, vol. 35, pp. 36–41, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.10.001.
- [104] Y. Higashiyama, Y. Ujiie, and K. Asano, “Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film,” *Journal of Electrostatics*, vol. 42, no. 1–2, pp. 63–68, Oct. 1997, doi: 10.1016/S0304-3886(97)00131-9.
- [105] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila, and L. Dascalescu, “Experimental study of the tribocharging process of plastic granular materials on a vibratory feeder device,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 5, pp. 1489–1496, Oct. 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6633675.
- [106] D. E. Fekir, M. Miloudi, F. Miloua, K. Medles, and L. Dascalescu, “New Propeller-Type Tribocharging Device With Application to the Electrostatic Separation of Granular Insulating Materials,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2416–2422, May 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2647802.
- [107] A. Mekhalef Benhafssa, T. Zeghloul, S. Messal, L. Dascalescu, and K. Medles, “Factors That Influence the Efficiency of a Propeller-Type Tribocharging Device for Granular Plastics,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 1446–1451, Mar. 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2636299.
- [108] M. Ando and J. Sukumaran, “Effect on Friction for Different Parameters in Roll–Slip of Polyamide–Steel Nonconformal Contacts,” *Tribology Transactions*, vol. 55, no. 1, pp. 109–116, Jan. 2012, doi: 10.1080/10402004.2011.636170.

- [109] V. L. Popov, *Contact Mechanics and Friction*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-10803-7.
- [110] N. K. Myshkin, M. I. Petrokovets, and A. V. Kovalev, “Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer,” *Tribology International*, vol. 38, no. 11–12, pp. 910–921, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.triboint.2005.07.016.
- [111] S. Sarkar, J. Cho, and B. Chaudhuri, “Mechanisms of electrostatic charge reduction of granular media with additives on different surfaces,” *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 62, pp. 168–175, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.cep.2012.07.009.
- [112] R. Mukherjee *et al.*, “Effects of particle size on the triboelectrification phenomenon in pharmaceutical excipients: Experiments and multi-scale modeling,” *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 11, no. 5, pp. 603–617, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ajps.2016.04.006.
- [113] D. J. Lacks, N. Duff, and S. K. Kumar, “Nonequilibrium Accumulation of Surface Species and Triboelectric Charging in Single Component Particulate Systems,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 18, p. 188305, May 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.100.188305.
- [114] K. M. Forward, D. J. Lacks, and R. M. Sankaran, “Particle-size dependent bipolar charging of Martian regolith simulant,” *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 13, 2009, doi: 10.1029/2009GL038589.
- [115] P. M. Ireland, “Dynamic particle-surface tribocharging: The role of shape and contact mode,” *Journal of Electrostatics*, vol. 70, no. 6, pp. 524–531, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.elstat.2012.08.004.
- [116] P. M. Ireland, “Triboelectrification of particulate flows on surfaces: Part II — Mechanisms and models,” *Powder Technology*, vol. 198, no. 2, pp. 199–210, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.powtec.2009.11.008.
- [117] J. Yao, F. Zhou, H. Yin, Y. Zhao, Q. Guo, and N. Li, “Experimental Investigation of Electrostatic Charge Generation for Granules,” *Procedia Engineering*, vol. 102, pp. 287–294, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.145.
- [118] J. Yao, C.-H. Wang, E. Wee Chuan Lim, and J. Bridgwater, “Granular attrition in a rotary valve: Attrition product size and shape,” *Chemical Engineering Science*, vol. 61, no. 11, pp. 3435–3451, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.ces.2005.12.013.
- [119] J. Coste and P. Pechery, “Influence of surface profile in polymer-metal contact charging,” *Journal of Electrostatics*, vol. 10, pp. 129–136, May 1981, doi: 10.1016/0304-3886(81)90032-2.
- [120] S. Karner, E. M. Littringer, and N. A. Urbanetz, “Triboelectrics: The influence of particle surface roughness and shape on charge acquisition during aerosolization and the DPI performance,” *Powder Technology*, vol. 262, pp. 22–29, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.04.025.

- [121] J. W. Kwek *et al.*, “High speed imaging with electrostatic charge monitoring to track powder deagglomeration upon impact,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 65, pp. 77–87, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.jaerosci.2013.07.011.
- [122] S. Naik, R. Mukherjee, and B. Chaudhuri, “Triboelectrification: A review of experimental and mechanistic modeling approaches with a special focus on pharmaceutical powders,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 510, no. 1, pp. 375–385, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.06.031.
- [123] E. Németh, V. Albrecht, G. Schubert, and F. Simon, “Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity,” *Journal of Electrostatics*, vol. 58, no. 1–2, pp. 3–16, May 2003, doi: 10.1016/S0304-3886(02)00137-7.
- [124] W. D. Greason, “Investigation of a test methodology for triboelectrification,” *Journal of Electrostatics*, vol. 49, no. 3–4, pp. 245–256, Aug. 2000, doi: 10.1016/S0304-3886(00)00013-9.
- [125] S. Naik *et al.*, “A combined experimental and numerical approach to explore tribocharging of pharmaceutical excipients in a hopper chute assembly,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 491, no. 1–2, pp. 58–68, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.ijpharm.2015.05.081.
- [126] M. Lungu, “Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect,” *Minerals Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 69–75, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.mineng.2003.10.010.
- [127] C. Liu and A. J. Bard, “Electrostatic electrochemistry at insulators,” *Nature Materials*, vol. 7, no. 6, pp. 505–509, 2008, doi: 10.1038/nmat2160.
- [128] T. Nomura, T. Satoh, and H. Masuda, “The environment humidity effect on the tribo-charge of powder,” *Powder Technology*, vol. 135–136, pp. 43–49, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0032-5910(03)00157-8.
- [129] S. Nieh and T. Nguyen, “Effects of humidity, conveying velocity, and particle size on electrostatic charges of glass beads in a gaseous suspension flow,” *Journal of Electrostatics*, vol. 21, no. 1, pp. 99–114, Jul. 1988, doi: 10.1016/0304-3886(88)90021-6.
- [130] M. Glor, “Hazards due to electrostatic charging of powders,” *Journal of Electrostatics*, vol. 16, no. 2–3, pp. 175–191, May 1985, doi: 10.1016/0304-3886(85)90041-5.
- [131] I. D. Pavey, “Electrostatic Hazards in the Process Industries,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 82, no. 2, pp. 132–141, Mar. 2004, doi: 10.1205/095758204322972771.
- [132] H.-C. Chou, C.-T. Yeh, and C.-M. Shu, “Fire accident investigation of an explosion caused by static electricity in a propylene plant,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 97, pp. 116–121, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.psep.2015.02.007.
- [133] P. Cartwright and V. Ebadat, “Controlling electrostatic hazards in bulk solids processes,” *Processing Magazine*. <https://www.processingmagazine.com/material-handling-dry-wet/powder-bulk-solids/article/53067620/controlling-electrostatic-hazards-in-bulk-solids-processes>

- [134] M. Kachi, “Caractérisation et contrôle de l’état de charge des matériaux polymères granulaires,” Thèses de Doctorat, Université de 08 Mai 1945 Guelma, 2011. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/207>
- [135] A. Moussaoui, “Etudes des phénomènes de charge et de neutralisation des milieux diélectriques granulaires en utilisant la décharge à barrière diélectrique,” Thèses de Doctorat, Université de 08 Mai 1945 Guelma, 2019. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/3807>
- [136] H. Baloul, “Etude de la contamination des aliments-simulants gras par les constituants de leurs emballages plastiques,” Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique - Alger, 2018. <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/1130>
- [137] W. Ammar-Mouhoub, “Amélioration des propriétés thermiques, mécaniques et physiques d’un composite à base de polypropylène chargé par du dioxyde de titane : rôle du traitement thermique et de l’épaisseur,” Mémoire de Magister, Université Ferhat ABBAS - Sétif 1, 2014. <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/1803>
- [138] H. Boulahia, “Etude du comportement physico-mécanique de nouveaux bio composites poudre de liège - PVC,” Thèse de Doctorat, Université M’Hamed Bougara – Boumerdès, 2016. <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/handle/123456789/3489>
- [139] S. Boufassa, “Nanocomposites à base de système polymères / renfort de structure lamellaire : conséquences des interactions sur la morphologie et les propriétés physico-chimiques des matériaux,” Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif 1, 2015. <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/1719>
- [140] N. Mohammedi, “Élaboration et caractérisation des composites et nano composites à matrice polyoléfinique : effet de la taille des particules de la charge et des agents compatibilisants,” Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2022. <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/3992>
- [141] S. Mouhoub, “Mesure de la charge dans les canalisations de transport des matériaux pulvérulents,” Mémoire de Master, Université de 08 Mai 1945 Guelma, 2019. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/4004>
- [142] L. Limam and K. Salhi, “Fonctionnalisation du polystyrène par l’acide oléique et application dans l’extraction de la fuchsine basique en solution aqueuse,” Mémoire de Master, université Akli Mouhand Oulhadje-Bouira, 2018. <http://dspace.univ-bouira.dz:8080/jspui/handle/123456789/6685>
- [143] “Qu’est-ce que le polystyrène (PS) et à quoi sert-il ?,” PCC Group Product Portal. <https://www.products.pcc.eu/fr/blog/quest-ce-que-le-polystyrene-ps-et-a-quoi-sert-il/>
- [144] H. Aouabdi, “Effet du brunissage sur les propriétés mécaniques d’un PEHD2050 concentré à 2.5% de noir de carbone,” Mémoire De Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019. <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/10/Aouabdi-Hadjer.pdf>

- [145] H. Halaoui and I. Khamel, “Effet de l’incorporation d’un déchet plastique sur les propriétés physico- mécaniques d’un mortier au jeune âge,” Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945 Guelma, 2022. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/12966>
- [146] N. Oudaifia, M. Kachi, A. Moussaoui, and A. Boudefel, “Cylindrical electrodes for neutralization of insulating flowing particles,” *Journal of Electrostatics*, vol. 110, p. 103556, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.elstat.2021.103556.
- [147] H. Mellouki, “Charge et decharge des materiaux isolants,” Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 - Guelma, 2019. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/5223>
- [148] M. Miloudi, “Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation électrostatique,” Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes - Sidi Bel Abbes, 2012. <https://dspace.univ-sba.dz/handle/123456789/2249>
- [149] “6514 Electromètre,” El Eslèk. <https://eleslek.tn/43-6514-electrometre.html>
- [150] “Lutron AM-4205A Vane Style Thermo-Anemometer Air Velocity Meter with Hygrometer,” Mitchell Instrument Company. <https://www.mitchellinstrument.com/lutron-am-4205a-vane-style-thermo-anemometer-with-humidity.html>
- [151] “347 - Voltmètre numérique by TREK, INC. | DirectIndustry,” Voltmètre numérique 347. <https://www.directindustry.fr/prod/trek-inc/product-72064-1646547.html>
- [152] I. Kuštrin, B. Jurjevčič, and A. Senegačnik, “An electrostatic measuring technique for monitoring particle size in dilute pneumatic transport,” *Thermal Science*, vol. 24, no. 6 Part B, pp. 4061–4073, 2020.
- [153] G. E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, and L. S. Leung, *Pneumatic Conveying of Solids: A theoretical and practical approach*, Troisième édition., vol. 8. in Particle Technology Series, vol. 8. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-3609-4.
- [154] P. Mehrani, M. Murtomaa, and D. J. Lacks, “An overview of advances in understanding electrostatic charge buildup in gas-solid fluidized beds,” *Journal of Electrostatics*, vol. 87, pp. 64–78, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.elstat.2017.03.005.
- [155] R. D. I. G. Dharmasena *et al.*, “Triboelectric nanogenerators: providing a fundamental framework,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 8, pp. 1801–1811, Aug. 2017, doi: 10.1039/C7EE01139C.
- [156] R. D. I. G. Dharmasena, K. D. G. I. Jayawardena, C. A. Mills, R. A. Dorey, and S. R. P. Silva, “A unified theoretical model for Triboelectric Nanogenerators,” *Nano Energy*, vol. 48, pp. 391–400, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.03.073.
- [157] S. Jantač, L. Konopka, and J. Kosek, “Experimental study of triboelectric charging of polyethylene powders: Effect of humidity, impact velocity and temperature,” *Advanced Powder Technology*, vol. 30, no. 1, pp. 148–155, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.appt.2018.10.017.

- [158] I. A. Harris, M. X. Lim, and H. M. Jaeger, “Temperature dependence of nylon and PTFE triboelectrification,” *Phys. Rev. Mater.*, vol. 3, no. 8, p. 085603, Aug. 2019, doi: 10.1103/PhysRevMaterials.3.085603.
- [159] M. H. Kalos and P. A. Whitlock, “Monte Carlo Methods, 2nd Edition | Wiley,” Wiley.com. 2009. <https://www.wiley.com/en-gb/Monte+Carlo+Methods%2C+2nd+Edition-p-9783527626229>
- [160] I. M. Sobol, *A Primer for the Monte Carlo Method*, 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781315136448.
- [161] G. Bonaccorso, *Machine Learning Algorithms*. Packt Publishing Ltd, 2017.
- [162] F. Pedregosa *et al.*, “Scikit-learn: Machine Learning in Python,” *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, no. 85, pp. 2825–2830, 2011.
- [163] S. Matsusaka, M. Ghadiri, and H. Masuda, “Electrification of an elastic sphere by repeated impacts on a metal plate,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 33, no. 18, p. 2311, Sep. 2000, doi: 10.1088/0022-3727/33/18/316.
- [164] F. Chowdhury, A. Sowinski, M. Ray, A. Passalacqua, and P. Mehrani, “Charge generation and saturation on polymer particles due to single and repeated particle-metal contacts,” *Journal of Electrostatics*, vol. 91, pp. 9–15, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.elstat.2017.11.004.
- [165] R. D. Cruise, K. Hadler, S. O. Starr, and J. J. Cilliers, “The effect of particle size and relative humidity on triboelectric charge saturation,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 55, no. 18, p. 185306, Feb. 2022, doi: 10.1088/1361-6463/ac5081.
- [166] S. Matsusaka, M. Oki, and H. Masuda, “Control of electrostatic charge on particles by impact charging,” *Advanced Powder Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 229–244, 2007, doi: 10.1163/156855207780208673.
- [167] H. Zou *et al.*, “Quantifying the triboelectric series,” *Nat Commun*, vol. 10, no. 1, p. 1427, Mar. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09461-x.
- [168] H. Zou *et al.*, “Quantifying and understanding the triboelectric series of inorganic non-metallic materials,” *Nat Commun*, vol. 11, no. 1, p. 2093, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-15926-1.